

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UNA RED INALÁMBRICA PARA
SUFRAGIO ELECTRÓNICO BASADA EN EL ESTÁNDAR ZIGBEE
(IEE802.15.4)**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

EDWIN SANTIAGO BORJA RAMÍREZ Y WÍLMER RAFAEL ANDRANGO DÍAZ

DIRECTOR:

ING. JAIME EDISON VELARDE GUEVARA

Quito, marzo 2007

DECLARACIÓN

Nosotros, Edwin Santiago Borja Ramírez y Wílmer Rafael Andrango Díaz, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Edwin Santiago Borja Ramírez

Wílmer Rafael Andrango Díaz

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Edwin Santiago Borja Ramírez y Wílmer Rafael Andrango Díaz, bajo mi supervisión.

Ing. Jaime Edison Velarde Guevara
DIRECTOR DE PROYECTO

A mis padres Rafael y Susana, a mis hermanos Norberto, Rómmel y Dardo; y a Dios por manifestarse todos los días de mi vida en cada uno de ellos.

¡Si el Señor es mi roca a nada le he de temer, si el Señor es mi roca nada me ha de vencer!

Wílmer Andrango

Al amor incondicional de mis padres Edgar & Luz y mis hermanos Alex & Verónica; a la fraternidad y alegría de amigos que dieron sentido a mi existencia; a la sabiduría de cada individuo que me ha ayudado a evolucionar; y a Dios por darme la oportunidad de experimentar las penas y gozos de la vida.

Santiago Borja

RESUMEN

A lo largo de los distintos capítulos se describen las características generales del protocolo Zigbee/IEEE 802.15.4, como su arquitectura, topología, modos de transmisión de la información y ventajas frente a otras tecnologías de área personal. Se justifican los pasos seguidos en el diseño y se describen los procesos de implementación del hardware y desarrollo del software a utilizar tanto en los terminales de votación como en el ordenador, para la transmisión, tratamiento y control de los datos del proceso de sufragio.

Además se da una breve explicación sobre las diversas herramientas y recursos utilizados para el desarrollo de la aplicación.

Ya al final encontrará los resultados obtenidos tras la puesta a prueba del sistema, podrán observar datos de alcance, consumo de energía y monitoreo de paquetes. Además de las conclusiones y recomendaciones obtenidas a lo largo del desarrollo de este trabajo.

PRESENTACIÓN

La investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, para dar soluciones a situaciones de la vida cotidiana han hecho posible la implementación de una novedosa aplicación para mejorar y asegurar la transmisión y tratamiento de los datos durante un proceso de sufragio, mediante el uso de la tecnología Zigbee.

Se deja en las manos del lector un trabajo realizado con mucha dedicación, y se espera que la información presentada sea de su total interés, entendimiento y sobre todo utilidad.

ÍNDICE

<u>CAPITULO 1</u>	<u>2</u>
<u>ANALISIS DEL ESTANDAR IEEE 802.15.4 / ZIGBEE</u>	<u>2</u>
<u>1.1 ANTECEDENTES</u>	<u>2</u>
<u>1.2 INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGIA ZIGBEE</u>	<u>3</u>
<u>1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO ZIGBEE</u>	<u>4</u>
<u>1.3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES</u>	<u>4</u>
<u>1.3.2 TIPOS DE DISPOSITIVOS</u>	<u>4</u>
<u>1.3.3 TOPOLOGÍAS</u>	<u>5</u>
<u>1.3.3.1 Topología Estrella.</u>	<u>5</u>
<u>1.3.3.2 Topología Árbol (Cluster Tree).</u>	<u>6</u>
<u>1.3.3.3 Topología Malla (Mesh Network).</u>	<u>6</u>
<u>1.3.4 TIPOS DE TRÁFICO SOPORTADO</u>	<u>6</u>
<u>1.3.4.1 Tráfico Periódico.</u>	<u>7</u>
<u>1.3.4.2 Tráfico Intermitente.</u>	<u>7</u>
<u>1.3.4.3 Tráfico Repetitivo Con Baja Latencia.</u>	<u>7</u>
<u>1.3.5 ARQUITECTURA</u>	<u>7</u>
<u>1.3.5.1 Capa Física</u>	<u>8</u>
<u>1.3.5.2 Capa de Control de Acceso al Medio</u>	<u>9</u>
<u>1.3.5.3 Capa Red</u>	<u>11</u>
<u>1.3.5.4 Capa Aplicación</u>	<u>11</u>
<u>1.3.6 FORMATO DEL MENSAJE ZIGBEE</u>	<u>12</u>
<u>1.3.6.1 PDU PHY</u>	<u>12</u>
<u>1.3.6.2 Trama MAC</u>	<u>13</u>
<u>1.3.6.2.1 Trama de datos.</u>	<u>13</u>
<u>1.3.6.2.2 Trama de ACK</u>	<u>13</u>
<u>1.3.6.2.3 Trama de Comandos</u>	<u>13</u>
<u>1.3.6.2.4 Trama de Beacon o Balizas</u>	<u>14</u>
<u>1.3.6.2.5 Supertrama</u>	<u>14</u>

<u>1.3.6.3 PDU NWK.</u>	15
<u>1.3.6.4 PDU APS.</u>	15
<u>1.3.6.5 Mensajes AF (Entorno de aplicación)</u>	15
<u>1.3.7 FORMACIÓN DE LA RED</u>	16
<u>1.3.8 MODELO DE TRANSFERENCIA DE TRAMAS</u>	17
<u>1.3.8.1 Transferencia de datos hacia el coordinador</u>	17
<u>1.3.8.2 Transferencia de datos desde el coordinador</u>	18
<u>1.3.9 TERMINOLOGÍA ZIGBEE A NIVEL APLICACIÓN</u>	18
<u>1.3.9.1 Perfil (Profile)</u>	18
<u>1.3.9.2 Descriptor de dispositivo (Device Description).</u>	19
<u>1.3.9.3 Objeto (Endpoint).</u>	19
<u>1.3.9.4 Atributo (Attribute).</u>	19
<u>1.3.9.5 Clúster (Cluster).</u>	19
<u>1.3.9.6 Relación (Binding).</u>	20
<u>1.4 APLICACIONES</u>	21
<u>1.5 COMPARACIÓN CON OTRAS TECNOLOGIAS PAN</u>	22
<u>1.5.1 COMPARACION CON X-10</u>	22
<u>1.5.2 COMPARACION CON BLUETOOTH</u>	23
<u>CAPITULO 2</u>	26
<u>DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE SUFRAGIO ELECTRÓNICO</u>	26
<u>2.1 SISTEMAS DE VOTACIÓN ELECTRÓNICO</u>	26
<u>2.2 DESCRIPCION DEL SISTEMA IMPLEMENTADO</u>	28
<u>2.2.1 GENERALIDADES</u>	28
<u>2.2.2 TRÁFICO</u>	29
<u>2.2.3 TOPOLOGÍA</u>	30
<u>2.2.4 SEGURIDAD</u>	30
<u>2.2.5 SUMINISTRO Y CONSUMO DE ENERGÍA</u>	32
<u>2.2.6 LOCALIZACIÓN Y ALCANCE</u>	32
<u>2.2.7 FACILIDAD DE USO</u>	32
<u>2.2.8 ORDENADOR Y SOFTWARE</u>	33
<u>2.3 PROCEDIMIENTO DE VOTACIÓN</u>	34

CAPITULO 3	38
<u>DISEÑO DEL HARDWARE</u>	38
3.1 <u>FUNCIONES DEL HARDWARE</u>	38
3.2 <u>ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA</u>	38
3.3 <u>SELECCIÓN DE COMPONENTES BÁSICOS EN LOS NODOS ZIGBEE</u>	39
3.3.1 <u>MICROCONTROLADOR</u>	41
3.3.1.1 <u>Fabricante</u>	41
3.3.1.2 <u>Modelo de microcontrolador</u>	42
3.3.2 <u>TRANSCEIVER RF</u>	43
3.4 <u>COMPONENTES DEL COORDINADOR DEL SISTEMA DE VOTAC...</u>	45
3.4.1 <u>CONVERSOR RS232/TTL</u>	45
3.4.2 <u>FUENTE DE ALIMENTACIÓN</u>	46
3.5 <u>COMPONENTES DE LOS NODOS TERMINALES/ESCLAVOS DEL SISTEMA DE VOTACIÓN</u>	46
3.5.1 <u>DISPLAY LCD</u>	46
3.5.2 <u>TECLADO</u>	47
3.5.3 <u>FUENTE DE ALIMENTACIÓN</u>	48
3.6 <u>HERRAMIENTAS DE DESARROLLO Y EVALUACIÓN</u>	48
3.6.1 <u>KIT DE DESARROLLO PICDEM Z</u>	48
3.6.2 <u>PROGRAMADOR/DEPURADOR MPLAB ICD 2</u>	49
3.6.3 <u>ANALIZADOR/SNIFFER IEEE 802.15.4</u>	50
3.7 <u>DIAGRAMAS CIRCUITALES</u>	52
3.7.1 <u>TARJETA MADRE</u>	52
3.7.1.1 <u>Coordinador</u>	52
3.7.1.2 <u>Terminal</u>	54
3.7.2 <u>TARJETA RF</u>	57
3.8 <u>ANALISIS DE COSTOS</u>	59
CAPITULO 4	62
<u>DISEÑO DEL SOFTWARE DE COMUNICACIÓN DE DATOS</u>	62

<u>4.1</u>	<u>DISEÑO DEL PROGRAMA FUENTE DE LOS MICROCONTROLAD...</u>	62
4.1.1	<u>HERRAMIENTAS PARA LA PROGRAMACIÓN</u>	62
4.1.1.1	<u>Lenguaje de programación</u>	63
4.1.1.2	<u>Entorno de desarrollo</u>	63
4.1.1.3	<u>Compilador</u>	64
4.1.2	<u>STACK ZIGBEE DE MICROCHIP</u>	66
4.1.2.1	<u>Funcionamiento</u>	66
4.1.3	<u>CREACIÓN DE APLICACIONES BASADOS EN EL STACK MICRO...</u>	68
4.1.3.1	<u>Creación de un perfil para el proyecto.</u>	68
4.1.3.2	<u>Estructura de los endpoints en cada dispositivo</u>	69
4.1.3.3	<u>Generación de archivos de configuración para capas inferiores</u>	70
4.1.3.4	<u>Creación del código fuente de la aplicación.</u>	71
4.1.3.5	<u>Compilación del Proyecto y programación en el microcontrolador.</u>	74
4.1.4	<u>CONTROL DE DISPOSITIVOS Y PERIFERICOS.</u>	74
4.1.4.1	<u>Display LCD</u>	74
4.1.4.2	<u>Teclado Matricial</u>	75
4.1.4.3	<u>Módulo USART – Comunicación serial</u>	76
4.1.5	<u>ANÁLISIS DEL CÓDIGO FUENTE PARA EL SISTEMA DE VOTACIÓN</u>	77
4.1.5.1	<u>Coordinador.</u>	77
4.1.5.1.1	<u>Inicialización.</u>	77
4.1.5.1.2	<u>Etapas Zigbee.</u>	77
4.1.5.1.3	<u>Etapas de aplicación.</u>	79
4.1.5.2	<u>Terminales.</u>	80
4.1.5.2.1	<u>Inicialización.</u>	80
4.1.5.2.2	<u>Etapas Zigbee.</u>	80
4.1.5.2.3	<u>Etapas de aplicación.</u>	81
<u>4.2</u>	<u>DISEÑO DEL SOFTWARE DEL ORDENADOR “VOTOZIGBEE”</u>	84
4.2.1	<u>DESCRIPCIÓN</u>	84
4.2.2	<u>HERRAMIENTAS DE PROGRAMACIÓN</u>	85
4.2.3	<u>BASE DE DATOS</u>	85
4.2.4	<u>COMPONENTES DEFINIDOS PARA EL PROYECTO</u>	87
4.2.5	<u>COMUNICACIÓN SERIAL</u>	87

<u>4.2.6</u>	<u>PROCESO DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS</u>	88
<u>4.2.7</u>	<u>PROGRAMA DE CONFIGURACIÓN “CANDIDATOS ZIGBEE”</u>	91
4.3	<u>SEGURIDADES</u>	92
<u>CAPITULO 5.</u>		95
<u>PRUEBAS Y RESULTADOS</u>		95
5.1	<u>GENERALIDADES</u>	95
5.2	<u>PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA</u>	95
<u>5.2.1</u>	<u>SUMINISTRO DE VOLTAJE</u>	95
<u>5.2.2</u>	<u>CONSUMO DE ENERGIA</u>	96
<u>5.2.3</u>	<u>RADIOFRECUENCIA Y PROPAGACIÓN</u>	96
<u>5.2.4</u>	<u>FUNCIONAMIENTO DE LA RED ZIGBEE</u>	98
<u>5.2.4.1</u>	<u>Análisis mediante el mensajes (logs) del sistema</u>	98
<u>5.2.4.2</u>	<u>Análisis mediante el analizador/sniffer.</u>	99
<u>5.2.4.2.1</u>	<u>Formación de la red</u>	100
<u>5.2.4.2.2</u>	<u>Asociación a la red</u>	100
<u>5.2.4.2.3</u>	<u>Re-asociación a la red</u>	101
<u>5.2.4.2.4</u>	<u>Envío información del RFD al Coordinador.</u>	101
<u>5.2.4.2.5</u>	<u>Petición del terminal (RFD) y envío de datos desde coordinador.</u>	102
<u>5.2.5</u>	<u>FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN</u>	102
<u>5.2.5.1</u>	<u>Terminal de votación</u>	102
<u>5.2.5.2</u>	<u>Coordinador</u>	103
<u>5.2.5.3</u>	<u>Software del ordenador.</u>	103
<u>CAPITULO 6</u>		105
<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>		105
6.1	<u>CONCLUSIONES</u>	105
<u>6.1.1</u>	<u>SISTEMAS DE VOTACIÓN ELECTRONICO</u>	105
<u>6.1.2</u>	<u>TECNOLOGIA ZIGBEE/IEEE 802.15.4</u>	105
<u>6.1.3</u>	<u>HARDWARE</u>	106
<u>6.1.4</u>	<u>SOFTWARE</u>	107
<u>6.1.5</u>	<u>CONCLUSIÓN FINAL</u>	108

6.2 RECOMENDACIONES 109**BIBLIOGRAFÍA** 111

ANEXOS

ANEXO 1. PCB TERMINAL VOTO ZIGBEE**ANEXO 2. MANUAL STACK ZIGBEE DE MICROCHIP****ANEXO 3. MANUAL HERRAMIENTA DE CONFIGURACIÓN ZENA****ANEXO 4. ESPECIFICACIONES PIC 18LF4620****ANEXO 5. ESPECIFICACIONES TRANSCEIVER RF CC2420****ANEXO 6. INTRODUCCIÓN AL COMPILADOR MPLAB C18****ANEXO 7. INTRODUCCIÓN A MPLAB IDE****ANEXO 8. GUÍA RÁPIDA DE USO DEL PROGRAMADOR MPLAB ICD 2****ANEXO 9. DESCRIPCIÓN PIXIE SNIFFER****ANEXO 10. MANUAL DE ADMINISTRACIÓN DEL SISTEMA DE SUFRAGIO
'VOTOZIGBEE'****ANEXO 11. CÓDIGO FUENTE DEL COORDINADOR****ANEXO 12. CÓDIGO FUENTE DE LOS TERMINALES****ANEXO 13. CÓDIGO DEL PROFILE VOTO ZIGBEE****ANEXO 14. CÓDIGO FUENTE DE LA APLICACIÓN VOTO ZIGBEE****ANEXO 15. CÓDIGO FUENTE APLICACIÓN PARA EDICIÓN DE DIGNIDADES**

CAP. 1

Análisis del estándar

Zigbee/802.15.4

CAPITULO 1

ANALISIS DEL ESTANDAR IEEE 802.15.4 / ZIGBEE

Este capítulo describe las características del protocolo Zigbee/IEEE 802.15.4. Se presenta su arquitectura, topologías, formato de la trama, tipos de tráfico soportados, elementos de red y sus posibles áreas de aplicación. Se establece además diferencias con otras tecnologías de redes personales (PAN).

1.1 ANTECEDENTES

Existen en la actualidad un gran conjunto de estándares dedicados a transferir altas tasas para aplicaciones de voz, video, redes LAN, etc. No obstante, hasta hace pocos años no existía un estándar inalámbrico dedicado a sensores y dispositivos de control. Dichos dispositivos no requieren un gran ancho de banda pero necesitan una baja latencia y bajo consumo de energía para lograr una duración de las baterías más larga y arreglos con un mayor número de dispositivos.

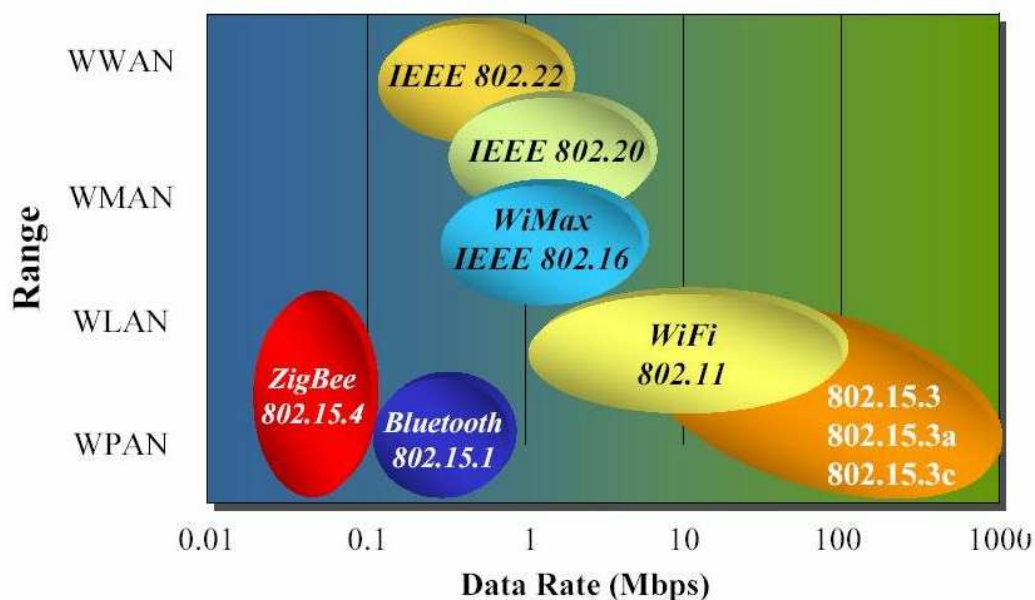


Figura 1-1: Soluciones inalámbricas en función del alcance y la velocidad de transferencia.

Hoy por hoy, existen soluciones creadas por diferentes fabricantes para cumplir con estos requerimientos, pero debido a la falta de un estándar abierto, se ha provocado un problema de interoperabilidad entre ellas.

Por este motivo, un gran número de empresas fabricantes han formado una alianza con el objeto de promover un estándar global y abierto para redes de sensores y control.

1.2 INTRODUCCIÓN A LA TECNOLOGIA ZIGBEE

La “Zigbee Alliance” nace como una alianza tecnológica, sin fines de lucro, conformada por más de 100 empresas, la mayoría de ellas fabricantes de semiconductores, con el objeto de auspiciar el desarrollo e implementación de una tecnología inalámbrica de área personal a bajo costo.

Empresas como Invensys, Mitsubishi, Honeywell, Philips y Motorola trabajan para crear un sistema estándar de comunicaciones, vía radio y bidireccional, para usarlo con dispositivos de control o monitoreo. La alianza justifica el desarrollo del estándar para cubrir el vacío que se produce por debajo de Bluetooth.

Al igual que Bluetooth, el origen del nombre Zigbee es oscuro y peculiar. La idea vino de una colmena de abejas pululando alrededor de su panal y comunicándose entre ellas.

Zigbee Alliance recurrió el estándar IEEE 802.15.4 como base para desarrollar las capas inferiores del protocolo Zigbee, permitiendo utilizar una topología de red tan variada como el número de aplicaciones que pueden llegar a ser imaginadas e incluye características de seguridad mediante algoritmos empotrados.

1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROTOCOLO ZIGBEE

1.3.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

El protocolo Zigbee/ IEEE 802.15.4 ofrece las siguientes características:

- Estándar para comunicación de datos a corto alcance.
- Basado la especificación IEEE 802.15.4 para redes de área personal.
- Bajo consumo y administración de energía.
- Bajo costo de los dispositivos, instalación y mantenimiento de la red.
- Utiliza bandas ISM de 2,4 GHz, 868 MHz (Europa) y 915 MHz (EEUU).
- Utiliza la tecnología Secuencia Directa de Espectro Ensanchado (DSSS).
- Alcance de hasta 75 metros.
- Velocidad 20 a 250 kbps.
- Topología Maestro/Esclavo.
- Hasta 65,536 nodos por red, 255 por subred.
- Control de acceso al medio CSMA-CA.
- Incorpora algoritmos de seguridad: de encriptación y de control de acceso.

1.3.2 TIPOS DE DISPOSITIVOS

Existen dos tipos de dispositivos definidos por el estándar IEEE 802.15.4:

- Dispositivo con funciones completas (FFD)
- Dispositivo con funciones reducidas (RFD)

La Zigbee Alliance ha clasificado los dispositivos en tres:

- Coordinador: Responsable de la asociación y desasociación de dispositivos en una red PAN. Sólo existe uno por red.
- Ruteador: Dispositivo capaz de enrutar mensajes entre dispositivos y soportar asociaciones.
- Terminal: Dispositivo donde se desarrollan las funciones de control u objetos a ser controlados.

Los FFDs utilizan cualquier topología y son capaces de comunicarse con cualquier otro dispositivo. Los FFDs pueden operar como: coordinador, ruteador o terminal.

Los RFD están limitados a utilizar la topología estrella, no pueden ser ni coordinadores ni ruteadores, sólo son capaces de comunicarse con el coordinador de la red. Su implementación es sencilla requiriendo de dispositivos de poca memoria y bajo costo. Pueden operar únicamente como terminales.

1.3.3 TOPOLOGÍAS

Zigbee permite implementar tres configuraciones básicas utilizando los dispositivos antes definidos.

1.3.3.1 Topología Estrella.

Consiste de un coordinador y uno o más dispositivos terminales. Los terminales se comunican entre sí a través del coordinador, quien determinará el destino de la información, a través de tablas de relaciones (conocidas en inglés como “bindings”) o utilizando direccionamiento directo.

- Dispositivo con funciones completas (FFD)
- Dispositivo con funciones reducidas (RFD)
- Coordinador (FFD)

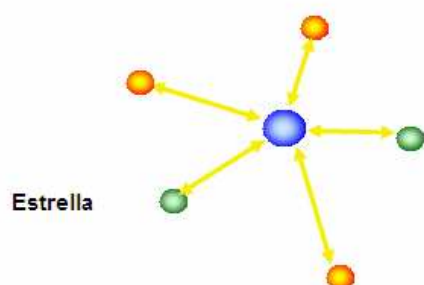


Figura 1-2: Topología Estrella

1.3.3.2 Topología Árbol (Cluster Tree).

Consiste de un coordinador más una o más configuraciones tipo estrella. Los ruteadores Zigbee extienden el rango de la red permitiendo a los dispositivos terminales unirse a ellos para comunicarse con el coordinador central. Los

ruteadores se comunican solamente con el coordinador y con los terminales, no entre ellos.

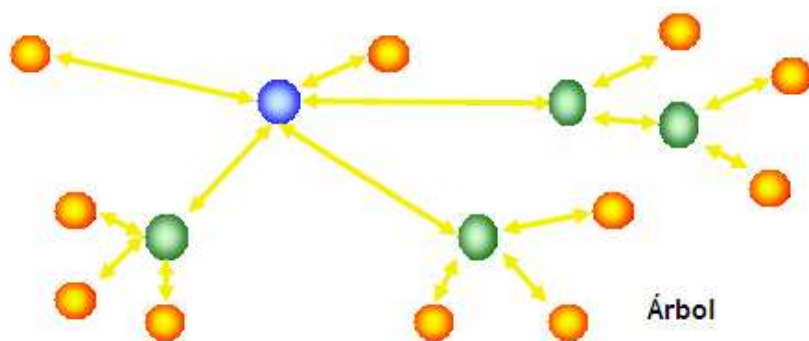


Figura 1-3: Topología Árbol

1.3.3.3 Topología Malla (Mesh Network).

Es similar a la topología árbol, con excepción que los FFDs pueden comunicarse directamente. Las ventajas de esta topología son la baja latencia y la alta confiabilidad. A cambio, se requiere mayor memoria de programa y datos en un dispositivo para soportarlo.

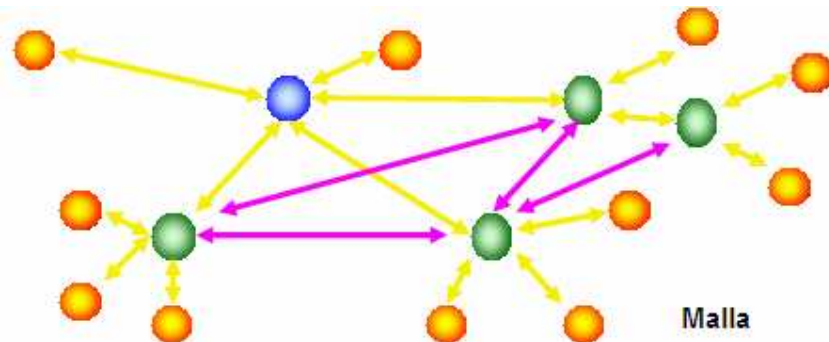


Figura 1-4: Topología Malla

1.3.4 TIPOS DE TRÁFICO SOPORTADO

Zigbee soporta tres tipos de tráfico de datos que pueden ser utilizados de acuerdo a la aplicación:

1.3.4.1 Tráfico Periódico.

Necesario para aplicaciones donde se envían y/o reciben datos transcurrido un lapso constante de tiempo, como es el caso de sistemas de sensores (control de temperatura, humedad, consumo de energía, etc.) en los cuales se necesita medir de forma constante la variable a controlar.

1.3.4.2 Tráfico Intermitente.

Diseñado para aplicaciones que envían y reciben datos cuando son estimulados por una señal externa, como es el caso de un interruptor o conmutador.

1.3.4.3 Tráfico Repetitivo Con Baja Latencia.

Útil para aplicaciones que requieren el reparto de ranuras o 'slots' de tiempo para controlar el acceso al medio, como por ejemplo para datos enviados por un ratón, teclado y otros dispositivos de un ordenador.

1.3.5 ARQUITECTURA

La arquitectura Zigbee está basada en el modelo de referencia OSI (Open Systems Interconnection), definiendo solamente aquellas capas relevantes para lograr la funcionalidad deseada y garantizar la compatibilidad entre los dispositivos.

El estándar IEEE 802.15.4-2003 define las dos capas base: la física (PHY) y la de control de acceso al medio (MAC). La ZigBee Alliance diseñó sobre ellas, la capa Red (NWK) y la capa Aplicación (APL)

La capa Aplicación (APL) está formada por la subcapa de soporte de aplicación (APS), el entorno de aplicación (AF), los objetos para dispositivos Zigbee (ZDO) y los objetos de aplicación definidos por el desarrollador.

A continuación, se describen las características principales definidas en cada capa del estándar Zigbee.

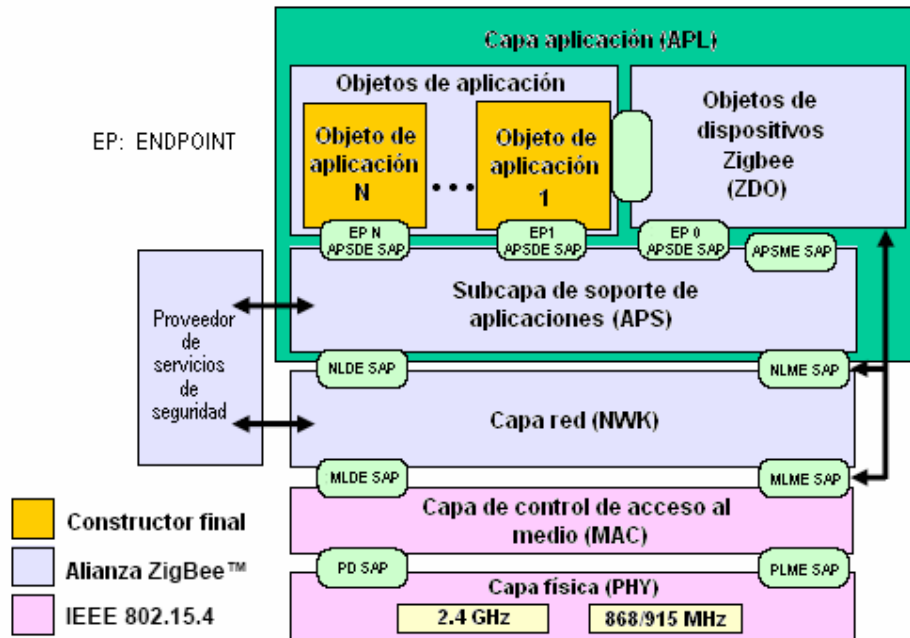


Figura 1-5: Arquitectura de ZigBee

1.3.5.1 Capa Física

El estándar IEEE 802.15.4-2003 permite elegir entre dos capas físicas en función de la banda de frecuencia a utilizar:

La primera cubre la banda europea de 868 MHz o la americana de 915 MHz, utilizando modulación de Secuencia Directa de Espectro Ensanchado (DSSS), así:

- 1 canal a 20 kbps en la banda europea.
- 10 canales a 40 kbps en la banda americana.

La segunda utiliza la banda de 2.450 GHz usada mundialmente, y además se basa también en la modulación DSSS.

- Trabaja hasta con 16 canales a 250 kbps

Entre las principales funcionalidades de la capa física tenemos la detección de energía del receptor (ED), indicador de calidad del enlace (LQI) y la evaluación del

estado del canal (CCA¹), activación y desactivación del transceiver, y la transmisión y recepción de datos.

En la tabla 1-1 se resumen las principales características técnicas de la capa física:

Tabla 1-1. Características físicas definidas por el protocolo Zigbee

Parámetro	2.4 GHz PHY	868/915 MHz PHY
Sensibilidad	-85 dBm	-92 dBm
Max señal entrada receptor	-20 dBm	
Rechazo a canal adyacente	0 dB	
Rechazo a canal alternante	-30 dB	
Potencia de salida	-3 dBm	
Número de canales	16	1/10
Espaciamiento entre canales	5 MHz	Canal simple/2 MHz
Tasas de transmisión		
Datos	250 kbps	20/40 kbps
Símbolos	62.5 kbaudios	20/40 kbaudios
Chips	2 Mchips/s	300/600 Mchips/s
Modulación de los chip	O-QPSK	BQPSK

1.3.5.2 Capa de Control de Acceso al Medio

Entre las principales funcionalidades y responsabilidades de la capa MAC tenemos:

- Transmisión de tramas, sincronización y provisión de un mecanismo de transmisión confiable.

¹ CCA (Clear Channel Assessment) permite conocer si el canal utilizado se encuentra libre para el intercambio de información (CSMA/CA).

- Define estructuras de trama sencillas con el fin de reducir el consumo de energía de los terminales Zigbee.
- Asociación y desasociación de dispositivos en la red. Implementa procesos para la reasociación de terminales a una red, a la cual previamente ya se asoció y no la abandonó aún. Esta característica es útil para reasociar un dispositivo que fue reiniciado, conservando la dirección de red ya asignada.
- Permite dos mecanismos para acceso al canal:
 - Red No-Beacon (sin radiobalizas). Se basa en el método ALOHA CSMA/CA, utiliza acuse de recibo positivo para informar la recepción de paquetes.
 - Red Beacon-enable (con radiobalizas). Utiliza supertramas para aplicaciones que requieren anchos de banda dedicados y baja latencia, el acceso al canal en cada segmento de tiempo se lo realiza con la técnica CSMA/CA libre de contención
- Diferencia a cada nodo de la red con un identificador único compuesto por 64 bits, que puede ser utilizado para el proceso de asociación o unión a la red. Además, se tiene una dirección de 16 bits, la cual es asignada por el coordinador para comunicarse con otros dispositivos de la red.
- Permite garantizar el uso de slots de tiempo para acceso al canal (GTS). El GTS es un método de calidad de servicio que asigna a cada dispositivo una duración específica de tiempo definida por el coordinador de la red dentro de la supertrama para realizar la tarea que requiera sin contención o latencia
- Define 3 niveles de seguridad: No seguro, mediante listas de control de acceso, y modo seguro (encriptamiento) utilizando el estándar para encriptación simétrica AES² 128.

² Un algoritmo simétrico significa comunicar a las partes usando la misma clave para encriptar y desencriptar los mensajes; por lo cual ambos deben encontrar previamente una

1.3.5.3 Capa Red

Entre sus responsabilidades incluye mecanismos para unirse y dejar una red. Además, tiene como tarea el descubrimiento y mantenimiento de rutas entre los dispositivos de la red. Adicionalmente, está a cargo de la labor de descubrimiento de vecinos y memorización de dicha información. En esta capa, el coordinador es responsable de iniciar una nueva red, cuando es necesario, y asignar direcciones a los nuevos dispositivos. Si el coordinador deja la red, otro FFD puede tomar su papel.

Las funciones de enrutamiento y seguridad son también implementadas en este nivel. Las diferentes opciones que brinda el protocolo pueden diferir de un nodo a otro, así la capa red debe configurar el stack³ del protocolo apropiadamente en cada uno de ellos.

1.3.5.4 Capa Aplicación

Esta capa consiste de la subcapa de soporte de aplicación (APS) y el entorno de aplicación (AF); la subcapa AF se divide nuevamente en objetos para dispositivos Zigbee (ZDO) y los objetos definidos por el diseñador.

La responsabilidad de la APS es brindar un conjunto general de servicios para el uso de las subcapas AF, incluyendo servicios para el mantenimiento de tablas para *'binding'*, que es la habilidad para relacionar dos dispositivos basados en sus servicios y necesidades, y el envío de mensajes entre ellos.

Las responsabilidades del ZDO son definir el rol de un dispositivo en la red (como coordinador o dispositivo final), iniciar y responder a un *"binding request"* (requerimiento de relación) y establecer vínculos seguros entre los elementos de la

forma de acordar la clave. Este algoritmo utiliza la encriptación/descriptación en bloques de 128 bits.

³ El stack o pila es el conjunto de capas que conforman la arquitectura de una tecnología. Durante la implementación se utilizará el denominador Stack Zigbee como referencia al conjunto de archivos que implementan cada capa de esta tecnología.

red. El ZDO es también responsable de descubrir dispositivos en la red y determinar qué servicios proveen.

El entorno de aplicación (AF) y sus objetos tienen la responsabilidad de procesar los datos propios de la aplicación.

Los objetos ZDO y AF son diferenciados ante la APS mediante un identificador de objetos (endpoints).

1.3.6 FORMATO DEL MENSAJE ZIGBEE

Un mensaje Zigbee consiste de máximo 127 bytes (133 bytes incluyendo la cabecera PHY) y se forma de la siguiente manera a través de las diferentes capas:

1.3.6.1 PDU⁴ PHY

Consiste de cinco bytes para sincronismo y un byte para indicar la longitud del payload⁵ del nivel superior.

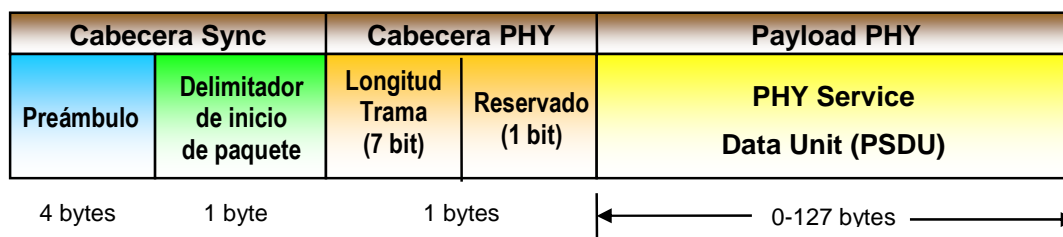


Figura 1-6: PDU de capa física

1.3.6.2 Trama MAC

Existen cinco tipos de trama:

1.3.6.2.1 Trama de datos.

⁴ PDU (Protocol Data Unit): Unidad de datos presente en una capa de una arquitectura OSI.

⁵ Payload: Carga útil o información enviada desde una capa superior.

Provee hasta 104 bytes para información en el payload, utiliza un campo para secuencia de datos y control de errores FCS

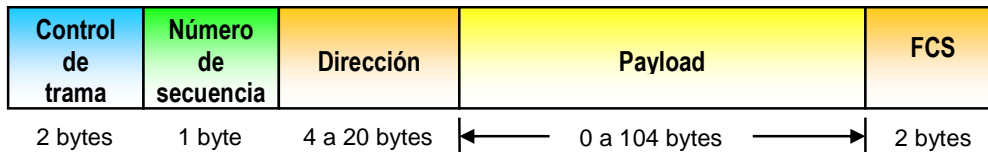


Figura 1-7: PDU MAC para datos

1.3.6.2.2 Trama de ACK

Provee una realimentación desde el receptor al emisor para informar que el paquete ha sido recibido correctamente.

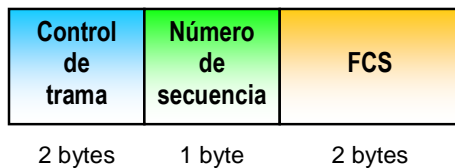


Figura 1-8: PDU MAC para ACK

1.3.6.2.3 Trama de Comandos

Provee un mecanismo para el control y configuración remota de los nodos. Permite un control centralizado de la red para configurar individualmente a los clientes sin importar que tan grande sea la red.

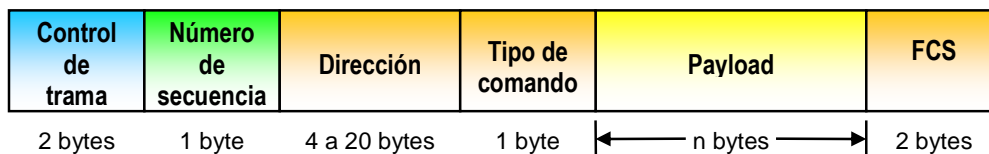


Figura 1-9: PDU MAC para control

1.3.6.2.4 Trama de Beacon o Balizas

Cuando un beacon es difundido en la red, los dispositivos clientes podrán despertar, sólo si, escuchan su dirección, de lo contrario retornarán a su estado de reposo. Los beacons son importantes en las topologías malla y árbol para mantener a todos los nodos sincronizados sin requerir un consumo innecesario de batería al escuchar el canal por largos periodos de tiempo.

Control de trama	Número de secuencia	Dirección de origen	Especificación supertrama	Campo GTS	Campos de direcciones pendientes	Payload	FCS
2 bytes	1 byte	4 a 10 bytes	2 bytes	k bytes	m bytes	n bytes	2 bytes

Figura 1-10: PDU MAC para beacons

1.3.6.2.5 Supertrama

Permite el uso de slots de tiempo para tráfico repetitivo. Está dividida en una parte inactiva y otra activa; en la primera todas las estaciones están en estado de reposo, en la segunda el tiempo está dividido en 16 slots que pueden asignarse en dos grupos: uno para período libre de contención (CFP) y otro para acceso con contención (CAP).

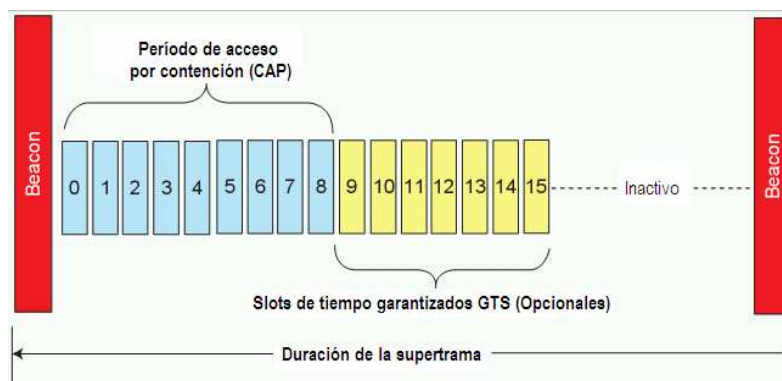


Figura 1-11: Supertrama MAC

1.3.6.3 PDU NWK.

Está compuesto principalmente por una cabecera y un payload. Los campos de la cabecera aparecen en un orden fijo, pudiendo los de dirección y secuencia no ser incluidos en todos los paquetes. Las PDUs pueden ser de datos o de comando.

Cabecera					Payload NWK
Control de Trama	Dirección Destino	Dirección Origen	Radio de Difusión	Número secuencia difusión	Payload
2 bytes	2 bytes	2 bytes	0/1 bytes	0/1 bytes	Variable

Figura 1-12: PDU Capa Red

1.3.6.4 PDU APS.

Está compuesto por una cabecera y un payload. Los campos de la cabecera aparecen en un orden fijo, pudiendo el de dirección no ser incluido en todas las tramas. Las PDUs pueden ser datos, comando y ACK. El campo de dirección incluye identificadores para los endpoints (objetos), el clúster, y el perfil; al recibir un mensaje, la aplicación procesa esta información y determina a que endpoint notificar.

Cabecera					Payload APS
Control de Trama	Endpoint de destino	Cluster ID	Profile ID	Endpoint de origen	Payload
1 byte	0/1 bytes	0/1 bytes	0/2 bytes	0/1 bytes	Variable

Figura 1-13: PDU capa APS

1.3.6.5 Mensajes AF (Entorno de aplicación)

A nivel AF se definen dos tipos de mensajes, el KVP (Key Value Pair) y el MSG (Message). Ambos tipos están asociados con un cluster ID, pero el KVP está diseñado para transferir información asociado a un atributo utilizando una estructura estricta, mientras el tipo MSG transfiere información mediante una estructura de formato libre.

Un mensaje KVP contiene la siguiente información, en este orden:

Cabecera AF		Transacciones				
Conteo Transac.	Tipo de Mensaje	Número Secuencia	Tipo Comando y Datos	Atributo Identif.	Código de Error	Datos KVP/Atributo
4 bits	4 bits	8 bits	8 bits	16 bits	0/8 bits	Variable

Figura 1-14: Mensaje AF KVP

El campo de tipo de comando indica lo que la aplicación tiene que hacer con la información. Por ejemplo, “Set”, requiere que el receptor establezca el valor del atributo (referido por el campo de identificador del atributo) al valor señalado por el campo de datos. El comando “Get with ACK” requiere que el receptor envíe el valor del atributo indicado por el campo de Identificación del atributo.

Un mensaje MSG contiene la siguiente información, en este orden:

Cabecera AF		Transacciones		
Conteo Transac.	Tipo de Mensaje	Número Secuencia	Longitud Transacción	Datos Transacción
4 bits	4 bits	8 bits	8 bits	Variable

Figura 1-15: Mensaje AF MSG

1.3.7 FORMACIÓN DE LA RED

Una nueva red Zigbee es establecida por un coordinador. Al inicializarse, el coordinador busca otros coordinadores en sus canales permitidos. Basado en la energía del canal y el número de redes encontradas en sus canales, establece su propia red y selecciona un identificador PAN único de 16 bits. Una vez que la nueva red ha sido establecida, los ruteadores y terminales son habilitados a unirse a red. En caso de conflictos por PAN ID repetidos en diferentes coordinadores, se efectúa un procedimiento de resolución que cambiará en uno de los coordinadores su identificador.

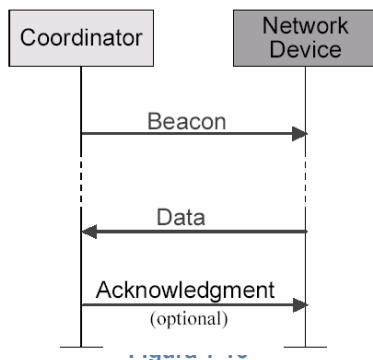
Los distintos dispositivos guardan información acerca de otros nodos de la red, en un área no volátil de memoria llamada tabla de vecindades. Al inicializarse, si un dispositivo determina a través de la tabla que fue parte de una red, puede ejecutar un procedimiento de notificación para localizarla. Los dispositivos (coordinadores o ruteadores) que reciban la notificación, verificarán sus tablas para cerciorarse de que el nuevo dispositivo pertenecía a su red. Si la notificación falla o el dispositivo no se encuentra en las tablas de vecindad del resto, tratará de unirse a una de las redes como un nuevo dispositivo.

Una vez en la red, un dispositivo puede desasociarse ya sea por pedido del coordinador o router (dispositivos padres) o por sí mismo.

1.3.8 MODELO DE TRANSFERENCIA DE TRAMAS

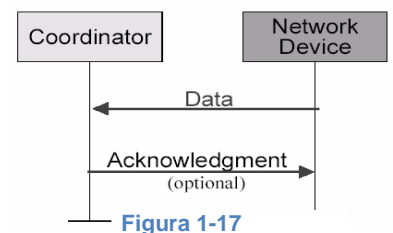
La comunicación entre coordinador y un dispositivo puede darse de las siguientes formas:

1.3.8.1 Transferencia de datos hacia el coordinador



En el caso de una red que utilice beacon-enabled, el dispositivo busca el beacon o baliza para sincronizarse a la estructura de la supertrama. Luego utiliza el método CSMA/CA con slots de tiempo para transmitir la información (ver Figura 1-16).

Para una red que no utilice beacon-enabled, el dispositivo utiliza el método CSMA/CA sin slots para transmitir la información (ver Figura 1-17).



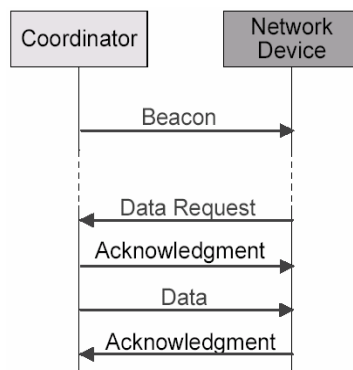


Figura 1-18

1.3.8.2 Transferencia de datos desde el coordinador

En una red beacon-enable (con balizas), el coordinador indica en el beacon que existen datos pendientes. El dispositivo periódicamente escucha el beacon y transmite un comando de pedido MAC usando la técnica CSMA/CA con slots de tiempo, si es necesario (ver Figura 1-18).

En una red sin beacon-enable, el dispositivo transmite un comando de pedido MAC usando CSMA/CA sin segmentación. Si el coordinador tiene datos pendientes, transmite sus datos bajo la misma técnica. En caso de no tener datos, el coordinador envía una trama de datos con un payload de longitud cero (ver Figura 1-19).

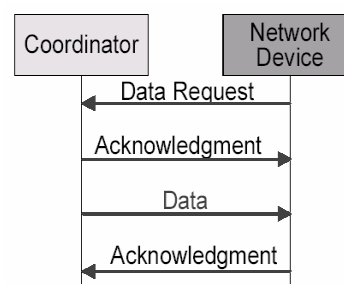


Figura 1-19

1.3.9 TERMINOLOGÍA ZIGBEE A NIVEL APLICACIÓN

Existen varios conceptos definidos a nivel de la capa aplicación que debemos comprender para lograr elaborar el diseño de una red Zigbee, entre las cuales tenemos:

1.3.9.1 Perfil (Profile)

Es un acuerdo en los mensajes, su formato y acciones que permiten a las aplicaciones residir en dispositivos separados y trabajar en forma cooperativa. Por ejemplo, un interruptor en un nodo puede comunicarse con una lámpara en otro nodo. Juntos, son parte de un perfil para “control de iluminación”.

Los perfiles permiten unificar diferentes soluciones, además que enfocan los esfuerzos en un área específica del mercado. Por ejemplo, distintos fabricantes de lámparas desearán que sus productos interactúen con los varios controles

producidos por un tercero, lo cual se garantizará utilizando un perfil común para iluminación certificado.

1.3.9.2 Descriptor de dispositivo (Device Description).

Es la delineación de la función de dispositivos específicos dentro de un segmento del profile. Por ejemplo en el perfil de “control de iluminación”, lámparas, switches y otros dispositivos tienen cada uno su descriptor.

1.3.9.3 Objeto (Endpoint).

Es un elemento particular dentro de un dispositivo. Cada dispositivo Zigbee dispone de una única dirección de red, por lo tanto se requiere de una dirección de “endpoint” que diferencie cada componente (interruptores, lámparas, sensores, etc).

Cada dispositivo Zigbee puede soportar hasta 240 de tales componentes. El endpoint 0 está reservado para la administración del dispositivo (subcapa ZDO)

1.3.9.4 Atributo (Attribute).

Es una entidad de datos que representa una cantidad física o un estado. El dato es comunicado a otro utilizando comandos (los más conocidos set, get, event).

1.3.9.5 Clúster (Cluster).

Están formados por uno o más atributos. Los clusters se diferencian entre ellos por un identificador, el cual está asociado con el flujo de datos saliente o entrante del dispositivo. Los identificadores de cluster son únicos dentro de un profile en particular. Las decisiones de relación son tomadas al formar un nexo entre un identificador de cluster saliente y uno entrante, dentro de un mismo profile.

1.3.9.6 Relación (Binding).

Creación de un enlace lógico unidireccional entre endpoints/interfaces/ clusters, de un nodo destino y otro de origen. Este enlace se puede establecer con uno o más

dispositivos. Los dispositivos son vinculados basados en los servicios que ofrecen y sus necesidades.

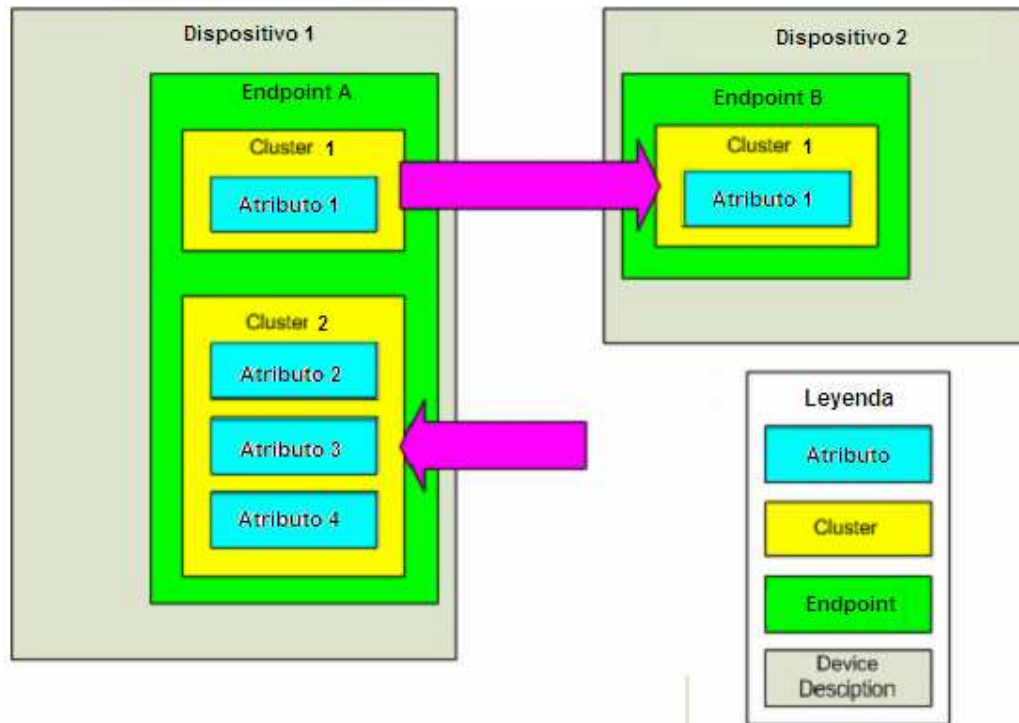


Figura 1-20: Relación entre Atributo/Cluster/Endpoints



Figura 1-21: Campos de aplicación

1.4 APLICACIONES

Un vasto número de aplicaciones industriales y caseras tienen un modesto requerimiento de transmisión de datos, pero demandan comunicaciones confiables y seguras usando sistemas sencillos de bajo costo y bajo consumo de potencia. (Ver figura 1-21)

El estándar Zigbee ha sido diseñado para satisfacer las necesidades de este tipo de mercado. Los circuitos integrados para el diseño en Zigbee buscan ser económicos, sencillos y además brindar escalabilidad con el fin de facilitar la comercialización de productos a gran escala.

Las principales áreas de aplicación para esta tecnología son:

- El monitoreo industrial
- Automatización de edificios (Domótica)
- Seguridad
- Monitoreo Ambiental
- Control del hogar
- Control de inventarios y bodega

Monitoreo Industrial. Como principales ventajas tenemos el bajo costo de instalación en comparación con los sistemas cableados, el mejor aprovechamiento del uso de energía a través de sistemas de control de energía en tiempo real y la mejora en la detección de fugas de sustancias nocivas para la salud.

Automatización de edificios. Entre los beneficios más importantes podemos mencionar la eliminación del cableado en los sistemas; ahorro de energía a través de la utilización de sistemas de iluminación, calefacción, ventilación y aire acondicionado controlados por sensores Zigbee; y la fácil y rápida configuración de dichos sistemas para adaptarlos a diferentes ambientes de trabajo.

Seguridad. Gracias a la posibilidad de conectar sensores a una red Zigbee, se puede detectar cambios dentro de un ambiente físico como por ejemplo movimiento, vibraciones, emisión o fugas de químicos, etc. provocadas por personal ajeno a una instalación.

Monitoreo Ambiental. Entre las aplicaciones en este campo podemos mencionar el monitoreo de las condiciones en puentes y carreteras para dar alerta en caso de deslaves o terremotos, control para la protección de especies en peligro de extinción y la medición a tiempo real de las condiciones ambientales que afectan a los campos de cultivo.

Control del hogar. En el hogar los distintos sistemas como iluminación, calefacción, seguridad y manejo de electrodomésticos, los cuales podrán ser administrados por el usuario mediante un dispositivo maestro de fácil instalación y manejo.

Control de inventarios y bodega. Los sensores Zigbee se pueden integrar a otras tecnologías inalámbricas como RFID (identificación por radio frecuencia) para identificar y monitorear diferentes objetos en el interior de un inmueble.

1.5 COMPARACIÓN CON OTRAS TECNOLOGIAS PAN

Existen en el mercado varias tecnologías de área personal tanto cableadas como inalámbricas. A continuación, se realiza un análisis comparativo con dos tecnologías de red PAN muy populares hoy en día.

1.5.1 COMPARACION CON X-10

Actualmente, X-10 es una de las tecnologías más populares en el área de la domótica, debido al bajo costo de su implementación y de sus equipos. Se basa en el envío de mensajes muy simples utilizando el cableado eléctrico como medio de transmisión. Brinda la característica plug&play para cualquier aplicación en el hogar y no se requiere un conocimiento especializado para configurar y operar la red.

A su simplicidad se oponen la baja velocidad, confiabilidad y la falta de seguridad. La tasa de transferencia es demasiado baja para aplicaciones de datos entre nodos. La alta degradación de la señal en el cableado eléctrico origina que se requiera una alta redundancia en la transmisión. La ausencia de seguridad impide que esta tecnología sea utilizada en aplicaciones críticas como por ejemplo control de acceso a una residencia.

Tabla 1-2. Comparación Zigbee vs X-10 (Tecnología cableada)

Tecnología	Medio Tx	Alcance (m)	Nº Dispositivos	Velocidad efectiva	Seguridad
X-10	Cableado Eléctrico	Decenas	256	60 bps	Ninguna
Zigbee	Inalámbrico	Decenas	255*	128 kbps	Alta

*cantidad de nodos por cluster.

1.5.2 COMPARACION CON BLUETOOTH

Tanto Zigbee como Bluetooth son tecnologías de área personal originadas del grupo de trabajo IEEE 802.15. Ambas utilizan la banda de frecuencia 2.4 GHz (no licenciada) buscando utilizar un mínimo de potencia y un tamaño reducido en los dispositivos. A pesar de su parecido, estas tecnologías buscan satisfacer necesidades diferentes.

El estándar Zigbee define una red de sensores para aplicaciones comerciales y residenciales tales como control de iluminación, aire acondicionado, calefacción, seguridad, etc, que no exigen grandes capacidades de transmisión.

Bluetooth busca eliminar el cableado para la comunicación entre productos y accesorios electrónicos, como por ejemplo la comunicación entre computador e impresora. Esta tecnología esta más orientada hacia la movilidad de los usuarios; Zigbee tiene como objetivo la automatización a gran escala y el control remoto.

Zigbee presenta un menor consumo de potencia debido a que el tiempo que requiere para cambiar entre los diferentes estados es mucho menor del que requiere Bluetooth, lo que implica mayor tiempo de vida de las baterías (una duración de un par de años)

Tabla 1-3. Comparación tecnología PAN: Bluetooth vs Zigbee

Tecnología	Alcance	N ^a Dispos	Velocidad efectiva	Módulación	Batería
Bluetooth	10	8 ⁶	720 kbps	FHSS	Recargable
Zigbee	30	255 ⁷	128 kbps	DSSS	No recargable

Por lo analizado anteriormente podemos concluir que Zigbee y Bluetooth son soluciones complementarias con diferentes campos de aplicación.

⁶ Bluetooth soporta hasta 8 dispositivos activos por "piconet". Sin embargo, esta tecnología permite la interconexión de "piconets" para formar una scatternet. A pesar que el direccionamiento es de 48 bits, el valor máximo práctico de nodos en una scatternet ronda la centena.

⁷ Teóricamente, el número máximo de nodos en una red estrella Zigbee es 65,536 (16 bits de direccionamiento). Sin embargo, en la topologías tipo árbol cada clúster o subred puede tener hasta 255 nodos (limitación definida por la variable nwkMaxChildren).

CAP. 2

Descripción del Sistema de Sufragio Electrónico basado en Zigbee

2 CAPITULO 2

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE SUFRAGIO ELECTRÓNICO

El presente capítulo justifica la utilidad y describe el sistema de sufragio creado utilizando la tecnología Zigbee. Se relaciona los requerimientos de un sistema de votación con las características brindadas por Zigbee, permitiendo con ello generar una bosquejo general del sistema, válido para el diseño e implementación del hardware y software del proyecto.

2.1 SISTEMAS DE VOTACIÓN ELECTRÓNICO

En la actualidad, cada proceso electoral demanda una gran inversión económica debido a los suministros, personal, transporte y otros recursos que se demandan. Además se hace necesario un gran planeamiento logístico para coordinar el evento y llegar al sitio adecuado en el momento que se necesite. Por último, los procesos actuales tienen un gran riesgo en la seguridad de la información, debido a la posible manipulación de los datos, especialmente en la tabulación de resultados en la cual se ven involucradas diferentes personas que podrían actuar fraudulentamente, cambiando el resultado real.



Figura 2-22. Proceso de sufragio tradicional

En los últimos años, han surgido y han sido implementados sistemas electrónicos que han hecho más sencillo y seguro el proceso electoral. Dichos sistemas tienen como ventaja principal almacenar los datos de forma digital para su futura tabulación, evitando la manipulación de los resultados.

Existen diversas formas de votación electrónica que varían según el grado de sofisticación técnica con el que se cuenta y el procedimiento utilizado. El elector puede usar su propia computadora (EE.UU) o, como en el caso de Brasil, el voto electrónico deberá ser emitido por él desde el lugar de votación que le fuera asignado. Pero más allá de las múltiples modalidades que hay, todas las formas de voto electrónico coinciden en brindar ciertas ventajas: bajo costo de implementación, rapidez en el recuento de los votos (apenas unos minutos son necesarios para conocer el resultado de cada urna), simplicidad del sistema (el voto electrónico no debería presentar especiales dificultades ni siquiera para aquellas personas que no están familiarizadas con las nuevas tecnologías), etc.

Sin embargo, además de esos ventajosos aportes, el sistema debe - fundamentalmente- ser seguro. Se tiene que garantizar un correcto funcionamiento. De hecho, la gran crítica al uso del voto electrónico en una elección pasa, justamente, por la desconfianza que brinda. Es necesario, dada la importancia del acontecimiento, que las redes por las que circulan los datos electorales den tranquilidad al elector. Los ataques cibernéticos a los servidores donde se alojan los resultados del escrutinio deben evitarse de cualquier manera.



Figura 2-23. Proceso de sufragio electrónico

Motivados por esta tendencia, el proyecto describe la creación de un sistema de votación electrónico con la principal característica de que se implementa en base a una red inalámbrica de bajo costo, bajo consumo de potencia y alta seguridad. El sistema se encuentra dirigido a cubrir un proceso electoral que consulte a un grupo humano reducido (colegios de profesionales, entidades educativas, etc.). Con ciertas adecuaciones, el mismo puede ser utilizado por encuestadoras, consultoras o empresas de servicio para receptar datos provenientes del público, y con ello diagnosticar y mejorar los servicios que prestan

Para cumplir con los requerimientos de seguridad, costo y consumo de energía fue seleccionada Zigbee como la tecnología sobre la cual se diseña el sistema, ya que además de ser una tecnología nueva y de estándar abierto (no propietario), tiene la virtud de requerir componentes sencillos para su implementación.

2.2 DESCRIPCION DEL SISTEMA IMPLEMENTADO

2.2.1 GENERALIDADES

El sistema de votación elaborado es una red prototipo que consta de tres nodos (un coordinador o maestro y dos terminales o esclavos) que se comunican inalámbricamente, y un ordenador que se comunica de forma serial con el nodo maestro.

El coordinador tiene la tarea de iniciar y mantener la red Zigbee, y de recibir los datos provenientes de los esclavos (terminales de votación) para transferirlos al ordenador para su tabulación.

Para la comunicación con el usuario cada terminal dispone de dispositivos de entrada/salida (teclado/display de cristal líquido), cuya interacción con el usuario es sencilla y requiere de la mínima asistencia por parte de personas ajenas al votante, quienes podrían influir en su decisión

El ordenador posee una base de datos con tablas de información de los votantes (similar al padrón electoral) y de registro de los votos. El software implementado autentifica al votante, recoge su selección y la tabula junto al resto de votos al finalizar el evento electoral.

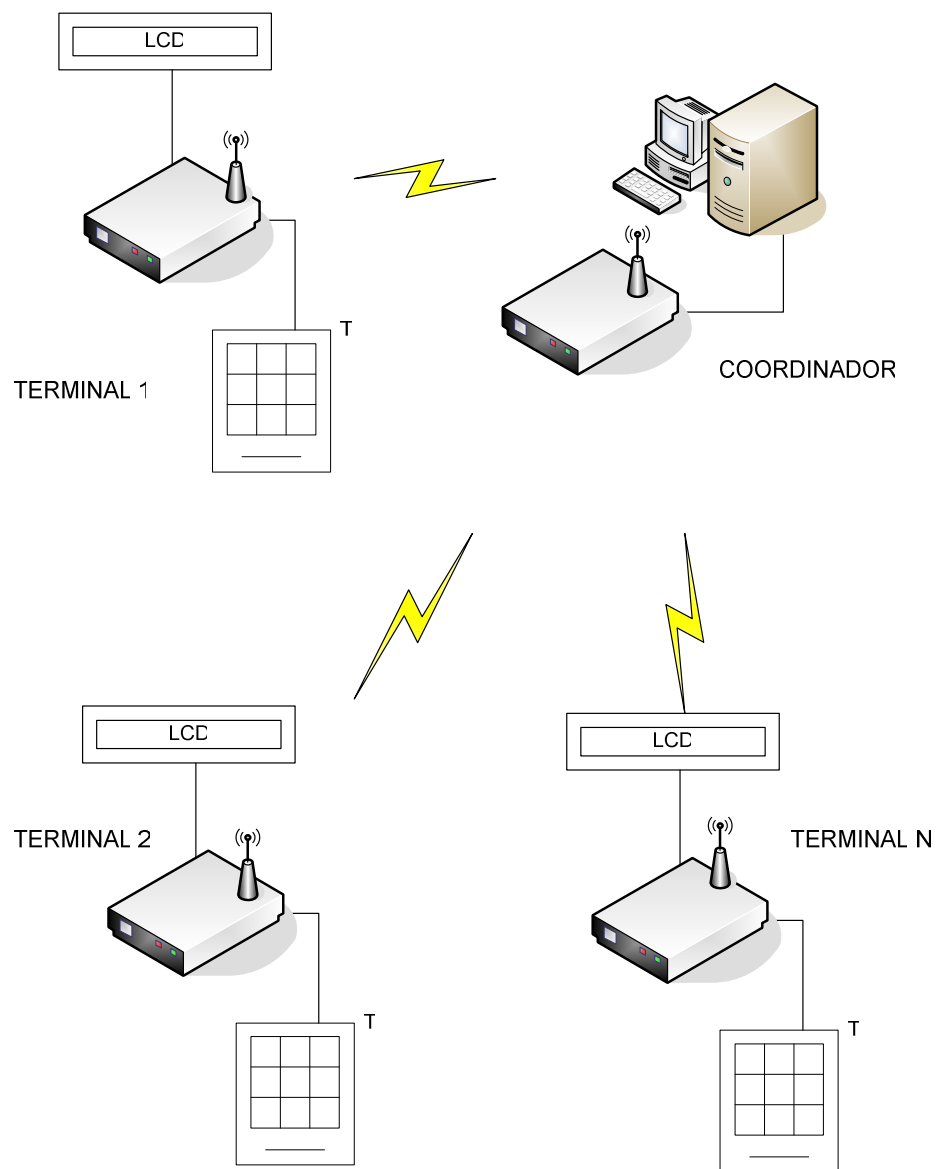


Figura 2-24. Representación del proyecto

2.2.2 TRÁFICO

Los procesos de votación no manejan un flujo continuo, ni periódico de información ya que en determinados momentos cada nodo puede ser requerido por un gran número de usuarios y en otros no presentar demanda alguna.

En consecuencia el tráfico utilizado en el proyecto es el intermitente, ya que los terminales transmiten información sólo cuando el usuario está en proceso de votación, caso contrario el dispositivo entra en estado de reposo para maximizar el ahorro de energía.

2.2.3 TOPOLOGÍA

Al ser un modelo prototipo, y teniendo en cuenta distintas limitaciones de accesibilidad y costo para conseguir los dispositivos y herramientas necesarias (microcontroladores, programador, software, etc.), se planteó como objetivo demostrar la factibilidad y sencillez de formar una red Zigbee a través de la implementación de una red básica, razón por la cual se ha escogido la topología estrella.

En el futuro, con mayores recursos económicos se podrá implementar redes con topologías más complejas como árbol y malla, las cuales soportan un número de nodos mayor y tienen un mayor alcance. Sin embargo, se requerirá de un mejor coordinador y ruteadores que necesitan mayores capacidades de memoria para almacenar la información sobre la red.

2.2.4 SEGURIDAD

La seguridad es un área fundamental en un sufragio, es importante garantizar la integridad física de los equipos, identificar y autorizar a los nodos a participar en la red, autenticar y autorizar a los votantes, garantizar la veracidad de la información, proteger la privacidad de los datos, entre otros aspectos. Es importante resaltar que

las medidas de seguridad se deben implementar en cada capa de la arquitectura Zigbee

A continuación se señalan las soluciones de seguridad implementadas, y consejos para ser tomados en cuenta para llevar a cabo durante un evento electoral.

A nivel físico, se debe precautelar el acceso al coordinador y a los terminales mediante personal o agentes de control que cuidarán su integridad y realizarán la autenticación mediante la solicitud de la documentación del posible votante . Se recomienda el uso de un UPS para enfrentar problemas o sabotaje del suministro de energía para el coordinador y el servidor. Adicionalmente, el servidor debe encontrarse física y lógicamente aislado de redes públicas o privadas inseguras que incrementen la probabilidad de un ataque cibernético.

A nivel de capa RED, se utiliza listas de acceso de direcciones para autorizar datos provenientes únicamente de los terminales de votación.

A nivel de aplicación el sistema verifica la validez de los datos, autentifica al usuario mediante su cédula de identidad y contraseña ingresadas, restringiendo la repetición de la votación de parte de un mismo usuario.

Una limitación a nivel de autenticación es la realización dentro de un mismo terminal de los procedimientos de identificación y de selección de voto (a diferencia de sistemas electrónicos utilizados en procesos electorales de gran escala). Como solución, cada usuario debe ingresar una contraseña que es verificada con la clave existente en la base de datos del ordenador/servidor..

Otra limitante es la no implementación de encriptación de los datos a nivel de las capas PHY/MAC⁸, ya que el soporte de esta característica depende de las herramientas de desarrollo a utilizar. Sin embargo, la mayoría de los fabricantes de

⁸ Sin ello, se permite gravemente la utilización de analizadores o sniffers (herramientas que permiten leer los paquetes que circulan en la red) que pueden facilitar la violación del sistema.

las herramientas de desarrollo en Zigbee deberán agregar la función de codificación AES 128 como requisito final para la certificación de su producto ante Zigbee Alliance, permitiendo con ello en el futuro corregir esta importante restricción.

2.2.5 SUMINISTRO Y CONSUMO DE ENERGÍA

El suministro de energía DC a cualquiera de los terminales se lo realiza mediante una batería o una fuente regulada del mismo voltaje. En cambio, el coordinador sólo utiliza una fuente regulada.

Para reducir el consumo de potencia, se da empeño en poner a los diferentes módulos terminales en modo de reposo (sleep) cuando no se encuentren en comunicación con el coordinador o con el usuario.

El ordenador utilizado como servidor funciona con 110V de alimentación AC, se recomienda su respaldoado y del coordinador mediante una fuente de emergencia o UPS para caso de fallas de la alimentación en la red eléctrica.

2.2.6 LOCALIZACIÓN Y ALCANCE

El sistema tiene como meta ser utilizado dentro de un área abierta o en recintos amplios (el hall del edificio de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la EPN, por ejemplo) donde no se encuentren obstrucciones (muros, paredes, etc.) y fuentes de interferencia que limiten el alcance de forma significativa. En el caso de una área abierta, se espera un radio de cobertura de entre 30 y 60m.

Dicho rango cubre el suficiente espacio para ubicar en un recinto el suficiente número de terminales para desarrollar un proceso electoral de baja a media escala.

2.2.7 FACILIDAD DE USO

El proyecto se esfuerza en ser sencillo en su instalación y mantenimiento para los responsables del proceso electoral, y amigable para el usuario.

La mayor restricción en este aspecto es el tipo y tamaño del display LCD, ya que uno gráfico puede mostrar mayor información al votante (como fotos de los candidatos) que un LCD de texto. Sin embargo, la diferencia de precios y de los requerimientos de memoria y velocidad del hardware que los controla, limita a utilizar uno de texto.

El número de líneas y caracteres en cada una son parámetros importantes a la hora de elegir un LCD de texto, ya que mientras mayores sean los valores de estos parámetros mejor será la interacción con el votante, pero también aumentará el precio en la producción

Todo esto limita al sistema de votación a ser dirigido a procesos electorales con un número reducido de candidatos (u opciones) que no requieran proporcionar al usuario de mucha información (fotos, logotipos, etc.).

2.2.8 ORDENADOR Y SOFTWARE

El computador utilizado en el sistema debe cumplir con algunos requerimientos básicos:

- ✚ Disponer de un puerto serial DB9 con interfaz RS232, para la comunicación con el coordinador.
- ✚ Trabajar con sistema operativo Windows 98 o superior para la ejecución del programa a crear.
- ✚ Debe respaldarse de un sistema contra fallas de energía (UPS) para evitar errores de comunicación con el coordinador por caídas en el suministro eléctrico.

El software desarrollado tiene como objetivos:

- ✚ Manejar la base de datos, permitiendo el ingreso de datos provenientes del sistema de votación.

- ✚ Controlar la seguridad e integridad de los datos: identificando a los votantes, evitando reintentos de sufragio, y reconociendo selecciones inválidas de parte del usuario.
- ✚ Presentar resultados y estadísticas del proceso electoral.
- ✚ Monitorear el funcionamiento del sistema para controlar su buen funcionamiento y advertir cualquier falla en la comunicación de los módulos para su pronta solución.

2.3 PROCEDIMIENTO DE VOTACIÓN

A continuación se describe el procedimiento general para que un individuo lleve a cabo la votación dentro del sistema, se analizan los posibles problemas a los que podría enfrentarse y se plantean soluciones contra ellos.

- El posible votante se identifica ante un agente (persona) de control, el cual verificará la validez de su documento de identificación y autorizará su votación. El agente tiene como misión controlar el buen uso del sistema como medida de seguridad y prevenir sabotajes a nivel físico.

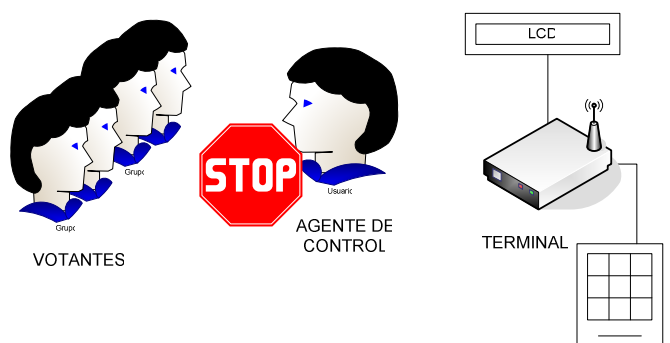


Figura 2-25. Autenticación ante el agente

- Una vez autorizado, el usuario se acerca al terminal, presiona la tecla INICIO para activar el sistema e ingresa su número de identificación y contraseña para ser verificado por la red. El dispositivo pedirá al usuario confirmar los datos ingresados para permitirle corregir errores de digitación.

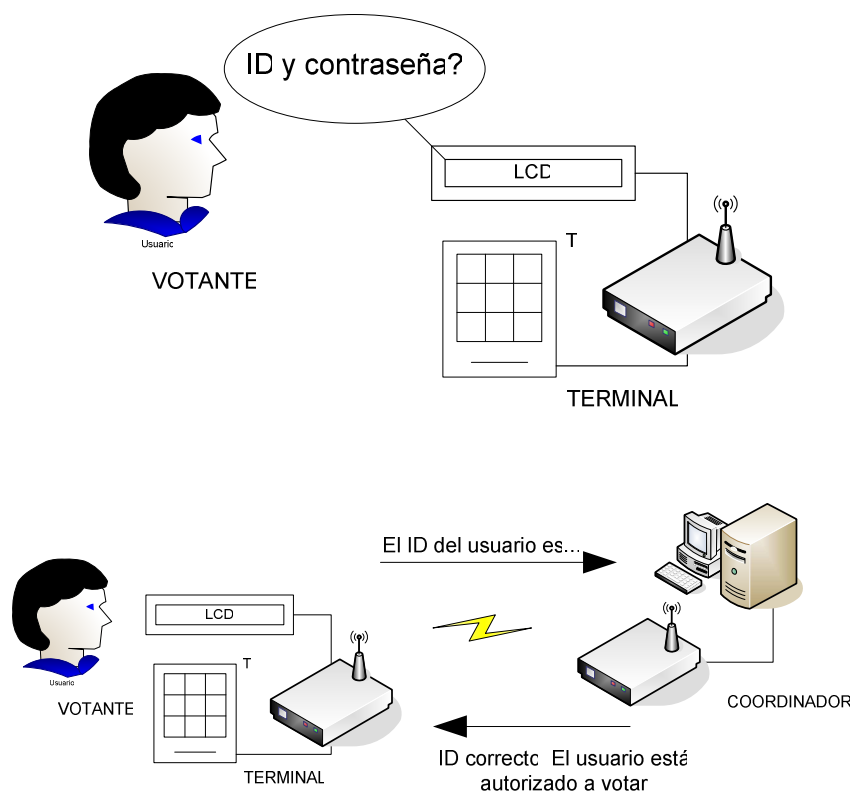


Figura 2-26. Autenticación ante el terminal y verificación del servidor.

- Ya autenticado por la red, el usuario procede con la votación. Mediante el LCD se identifica la dignidad, y enumerará las opciones. Se permite al usuario el ingreso del número que represente la opción de su preferencia y se pedirá una confirmación de su voto antes de enviarlo. En caso negativo en la confirmación, tendrá la oportunidad de ingresar el voto nuevamente. Si ingresase una opción inexistente y lo confirmará, se le enviará un mensaje informándole de ello y el voto será considerado nulo. Se repetirá este último procedimiento, en caso de elección de más dignidades.

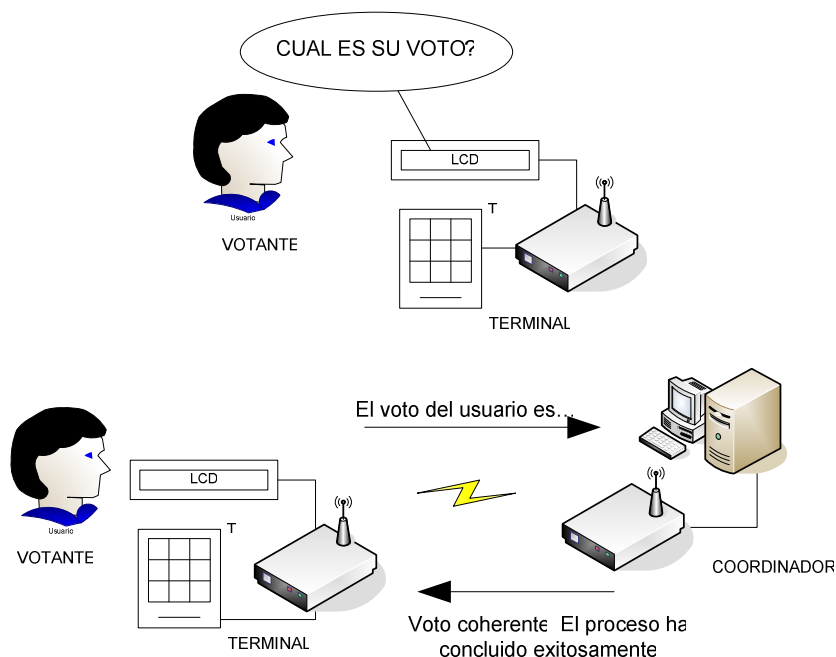


Figura 2-27. Recolección y procesamiento del voto

- Finalmente se despliega un mensaje informando sobre el éxito del proceso (Por ejemplo: "Su voto ha sido procesado"). Una vez concluido este proceso, el votante será marcado en la base de datos para evitar un posible reintento de votación que podría afectar la credibilidad del proceso.

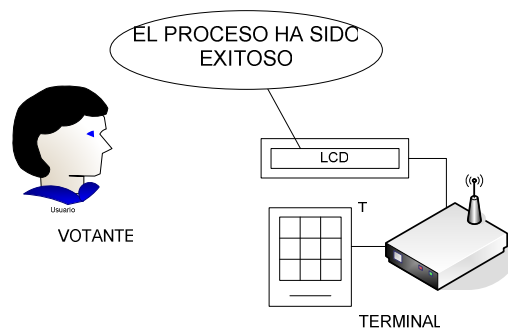


Figura 2-28. Informe de éxito del proceso

CAP. 3

Diseño del Hardware

3 CAPITULO 3

DISEÑO DEL HARDWARE

El presente capítulo describe el proceso de selección y diseño de los dispositivos, y los componentes requeridos para el funcionamiento de la red Zigbee que soporta el sistema de votación electrónico-inalámbrico.

3.1 FUNCIONES DEL HARDWARE

El hardware tiene las siguientes responsabilidades:

- ✚ Incluir dispositivos para la transmisión y recepción de datos formando una red inalámbrica bajo el estándar Zigbee.
- ✚ Permitir la interacción de los terminales con el usuario mediante el uso de dispositivos de entrada/salida.
- ✚ Permitir la comunicación serial entre el computador y el coordinador Zigbee.
- ✚ Proporcionar el interfaz necesario para la programación del software requerido por los nodos.
- ✚ Suministrar la energía requerida para el funcionamiento de los distintos módulos.

3.2 ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA

De acuerdo a la descripción realizada en el capítulo anterior, la figura 3-1 muestra el diagrama de bloques del sistema de sufragio a implementar.

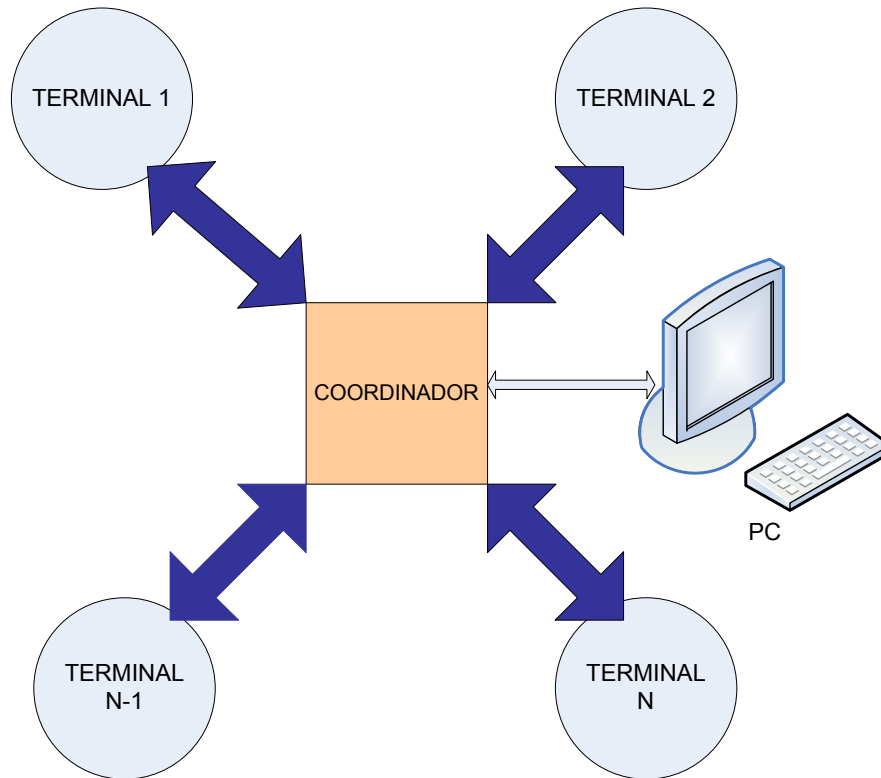


Figura 3-29. Esquema de Bloques del Proyecto

3.3 SELECCIÓN DE COMPONENTES BÁSICOS EN LOS NODOS ZIGBEE

Para el desarrollo en Zigbee, cada nodo debe disponer de un circuito de control y otro de transmisión/recepción de radio frecuencia RF. Por ello según su presentación se disponen en el mercado de dos opciones en sistemas de desarrollo:

- + **Módulos Comerciales:** Incorporan en un solo empaque un dispositivo de control (microprocesador), el transceiver RF e incluyen el programa para su funcionamiento. Su principal ventaja es el tamaño, la facilidad de manejo y gran soporte brindado, su desventaja es el alto precio de los kits de desarrollo (\$2000 en adelante por kit).

- + **Sistemas Microcontrolados:** Su ventaja principal está en el precio y flexibilidad en el diseño, ya que requiere solo añadir el transceiver al microcontrolador.

Sus principales desventajas son los procesos de adquisición y armado de aplicaciones, limitaciones de memoria, y la necesidad de crear o conseguir las librerías necesarias para desarrollar el programa requerido por el microcontrolador.

Por razón de costos y el gran apoyo actual de las empresas fabricantes de microcontroladores a la tecnología Zigbee, el diseño e implementación de los nodos será efectuado en base a dichos dispositivos.

Utilizando microcontroladores, cada nodo Zigbee requiere de dos conjuntos de circuitos que agrupan los componentes principales:

- ✚ Tarjeta Madre. Contiene como componente principal al microcontrolador, cuyo objetivo es el control de todo el sistema. Su elección (arquitectura, marca y modelo) se basa en sus características de memoria, velocidad, periféricos internos incluidos, y del soporte mediante librerías que brinden para la implementación del protocolo Zigbee.
- ✚ Tarjeta RF. Basado en el transceiver de radiofrecuencia, su tarea es la transmisión y recepción de datos que son suministrados por el microcontrolador.

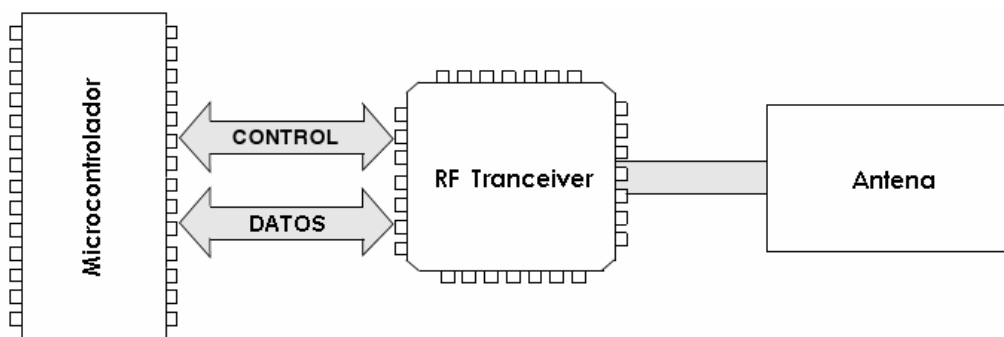


Figura 3-30. Nodo básico Zigbee utilizando un microcontrolador y un transceiver

3.3.1 MICROCONTROLADOR

3.3.1.1 Fabricante

Actualmente existen tres reconocidas casas fabricantes de microcontroladores asociadas a la Zigbee Alliance que desarrollan herramientas de soporte para el desarrollo de esta tecnología:

- ✚ FREESCALE (Motorola): Ha puesto a la disposición de forma gratuita, el código fuente con la adaptación del “stack” Zigbee para sus microcontroladores, el cual implementa cada una de sus capas y permite al desarrollador concentrarse en la capa aplicación Zigbee.

- ✚ ATMEL: Popular desarrollador de microcontroladores de la familia 8051. Hasta la fecha no ha lanzado al mercado su adaptación del stack ni las herramientas de desarrollo para Zigbee.

- ✚ MICROCHIP: Fabricante de los populares microcontroladores PIC que utilizan la arquitectura Harvard⁹/RISC¹⁰. Al igual que Freescale, ha lanzado su propia adaptación del “stack” en forma gratuita para el diseño de aplicaciones Zigbee utilizando los microcontroladores PIC de la familia 18. Adicionalmente, ha puesto a disposición del público, kits y herramientas desarrollo de dichas aplicaciones.

Debido a la popularidad, precio de los PIC y el amplio apoyo brindado a la tecnología Zigbee se opta por utilizar los microcontroladores Microchip de la familia 18. Como consecuencia de ello, su versión del “stack” es el utilizado para el desarrollo del programa.

⁹ La arquitectura Harvard consiste en la disposición de dos memorias independientes y sus respectivos buses de datos, una sólo para instrucciones y otra sólo para datos. Esto diferencia, a ésta con la arquitectura von Neumann utilizada por la familia de microcontroladores 8051.

¹⁰ Se refiere a procesadores con un repertorio de instrucciones de máquina muy reducido, simple y que se ejecutan generalmente en un solo ciclo, permitiendo optimizar el hardware y el software.

3.3.1.2 Modelo de microcontrolador

La elección del modelo de PIC se basará en la cantidad de memoria de programa, requerida por el código fuente del Stack Zigbee de Microchip; la cantidad de memoria de datos adecuada para la aplicación; y de los pines disponibles que serán requeridos por los dispositivos a ser conectados.

Según la documentación del Stack para Zigbee de la Microchip (actualmente en la versión 3.6), los requerimientos mínimos de memoria programa se indican en la tabla 3-1.

Tabla 3-4. Requerimientos Stack Zigbee de Microchip

Dispositivo	Memoria de Programa requerida por el Stack para Zigbee ¹¹ de Microchip
Coodinador	33309 bytes
Dispositivo Terminal	19585 bytes
Router	31616 bytes

Debido a que se espera conectar en cada terminal un teclado (8 pines), un LCD (6 pines) y el transceiver RF (10 pines), se requiere de por lo menos de 24 pines. Por ello se elige un microcontrolador de 40 pines de empaque PDIP y con más de 24 pines de entrada/salida.

Cabe destacar que el microcontrolador PIC 18LF4620¹² es utilizado por Microchip en su kit de desarrollo Zigbee PICDEM Z. Este microcontrolador de 40 pines en empaque PDIP de la familia 18 dispone de 64kbytes de memoria de programa y 4 kbytes de memoria de datos. Además soporta opciones de ahorro de energía,

¹¹ El Stack para Zigbee implementado por Microchip es un conjunto de archivos con código fuente en lenguaje C que implementan las diferentes capas del protocolo Zigbee y permiten desarrollar aplicaciones en ese estándar utilizando los microcontroladores de este fabricante.

¹² El PIC 18LF4620 es semejante al modelo estándar (PIC 18F4620) con la diferencia única en el rango más amplio de voltaje que maneja el primero (de 2V a 5V), lo cual es necesario para el interfaz con el transceiver RF que maneja 3,3V

recomendado para aplicaciones Zigbee. Por estos motivos, se selecciona este microcontrolador tanto para el coordinador como para los dispositivos terminales (esclavos).

Tabla 3-5. Características principales del PIC 18LF4620

Device	Program Memory		Data Memory		I/O	10-bit A/D (ch)	CCP/ ECCP (PWM)	MSSP		EUSART	Comp.	Timers 8/16-bit
	Flash (bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (bytes)	EEPROM (bytes)				SPI™	Master I ² C™			
PIC18F4620	64K	32768	3986	1024	36	13	1/1	Y	Y	1	2	1/3

3.3.2 TRANSCEIVER RF

El transceptor (transceiver) es el encargado de implementar la capa PHY y MAC establecidas en el estándar IEEE 802.15.4.

El “stack” Zigbee de Microchip, a ser utilizado en el desarrollo del software para el microcontrolador, se encargará de controlar al transceiver mediante el código fuente que incluye para las capas PHY y MAC. Esto impide a los desarrolladores de aplicaciones desviar sus esfuerzos en el manejo del circuito de RF.

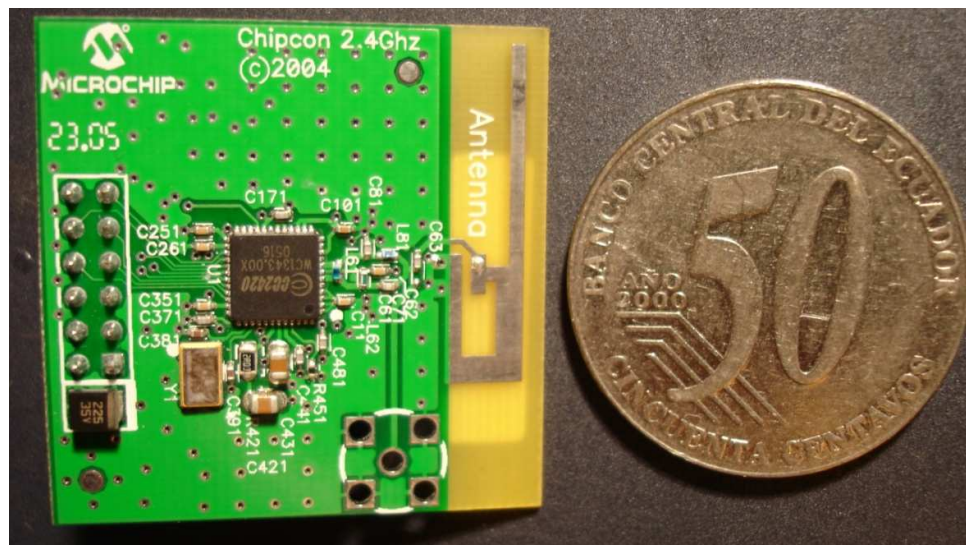


Figura 3-31. Tarjeta RF PICDEM Z basado en el transceiver CC2420

La última versión del Stack de Microchip (v3.6) brinda soporte a tres modelos de

transceiver: CHIPCON CC2420, UBEC 2400 y Microchip MRF24J40¹³. De los tres, el CHIPCON CC2420 es el de mayor comercialización y de mayor disponibilidad.

Una acotación importante es que Microchip ha lanzado al mercado tarjetas RF que contienen en su mayoría el transceiver CHIPCON CC2420 con los elementos necesarios para su funcionamiento, todos ellos integrados e interconectados en un espacio muy reducido.

Por lo tanto, por motivo de disponibilidad, se opta por utilizar la tarjeta RF PICDEM Z comercializada por Microchip en sus kit de desarrollo y que tiene como elemento principal el transceiver CHIPCON CC2420 e incorpora una antena PCB (trazada en el circuito impreso).

Las principales características del dispositivo CHIPCON CC2420¹⁴ son:

- ✚ Transceiver RF 2400-2483.5 MHz
 - ✚ Tecnología DSSS.
 - ✚ Velocidades de 250 kbps, 2 Mchips/s.
 - ✚ Modulación OQPSK.
 - ✚ Bajo consumo de energía (RX: 18.8 mA, TX: 17.4 mA).
 - ✚ Alta sensibilidad (-95 dBm).
 - ✚ Alto rechazo de canal adyacente (30/45 dB).
 - ✚ Alto rechazo de canal alternante (53/54 dB).
 - ✚ Oscilador controlado por voltaje (VCO) interno.
 - ✚ Valores de potencia de salida programables.

- ✚ Buffers de entrada y salida independientes de 128 bytes.
- ✚ Requiere de reducido número de componentes externos.

¹³ A partir de la versión 3.6 del Stack Zigbee de la Microchip, el transceiver MRF24J40 es la opción recomendada. Su comercialización empieza desde Marzo del 2007

¹⁴ Para mayor información de características y del interfaz consulte la hoja de datos del Transceiver RF CC2420

El microcontrolador y el transceiver CC2420 utilizan cuatro líneas de entrada/salida para la comunicación serial SPI (SI, SO, SCLK, CSn). Adicionalmente, los pines FIFO y FIFOP indican el estatus de los buffers de entrada y salida. El pin SFD es utilizado para obtener la información de reloj del transceiver. El pin CCA indica si el canal esta libre.

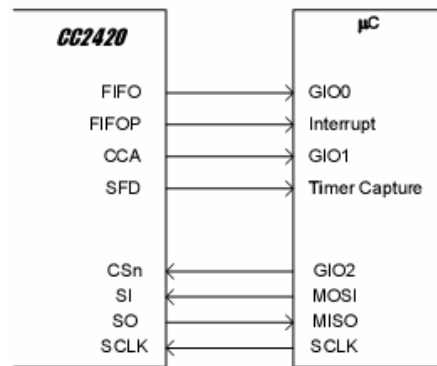


Figura 3-32. Interfaz Microcontrolador-CC2420

3.4 COMPONENTES DEL COORDINADOR DEL SISTEMA DE VOTACIÓN

Adicionalmente al microcontrolador y al transceiver RF se requieren de otros componentes para cumplir con las tareas asignadas. La figura 3-5 muestra como se comunican los diferentes dispositivos que conforman el nodo coordinador.

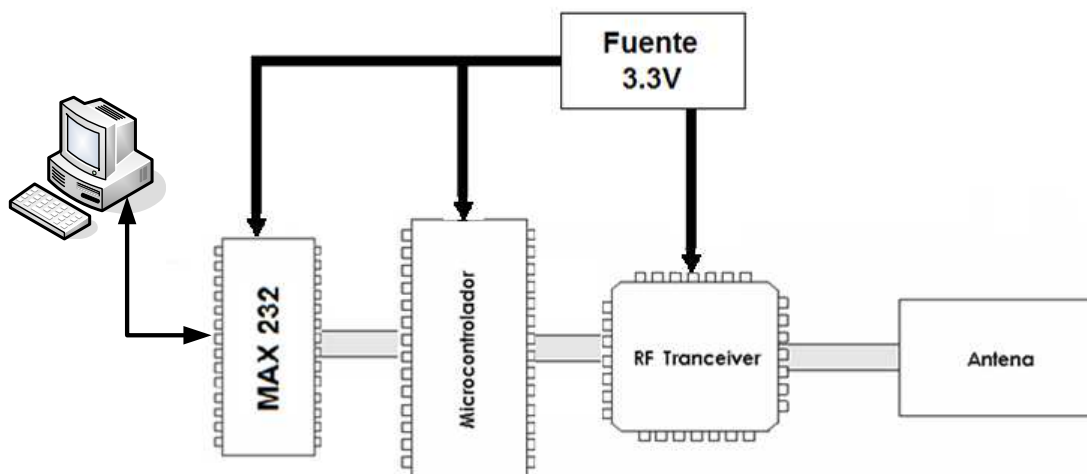


Figura 3-33. Bloques del Coordinador

3.4.1 CONVERTOR RS232/TTL

Se utiliza un conversor MAX232 para lograr la comunicación entre el microcontrolador del coordinador y un ordenador personal. Este chip transforma las señales digitales de voltajes TTL a valores aceptados por el interfaz RS-232.

3.4.2 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Para alimentar con 3.3V al microcontrolador y el transceiver RF, se regula el voltaje de entrada de 9V proveniente de un adaptador AC/DC.

3.5 COMPONENTES DE LOS NODOS TERMINALES/ESCLAVOS DEL SISTEMA DE VOTACIÓN

A más del Microcontrolador y el RF, se añaden otros dispositivos al nodo Zigbee para desempeñar la labor de una terminal de votación, cuya composición se ilustra en la figura 3-6.

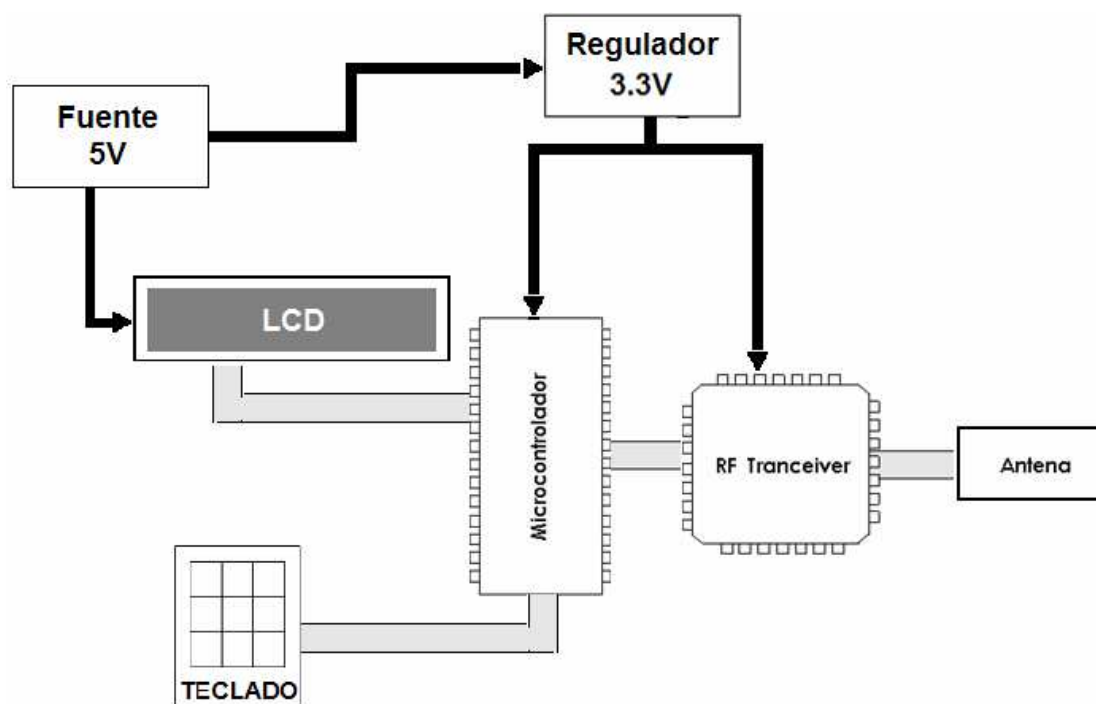


Figura 3-34. Bloques del terminal de votación.

3.5.1 DISPLAY LCD

Los módulos LCD (Liquid Crystal Display), son compactos y necesitan muy pocos componentes externos para un funcionamiento correcto. La función principal de estos módulos es la de visualizar los caracteres deseados por el usuario.

En los nodos terminales, se utilizarán displays LCDs basados en el controlador estándar Hitachi HD44780, el cual define claramente una distribución de pines e instrucciones de control para su manejo.

En la pantalla se pueden visualizar hasta 40 caracteres en sus dos líneas (20 por línea) Este dispositivo dispone de 14 pines¹⁵ de los cuales 2 son para alimentación (VSS y VDD), 1 para ajuste de contraste (V0) , 3 para control (RS, R/W y RS) y los restantes 8 para transmisión/recepción de datos (D0-D7).

El controlador permite enviar datos utilizando 4 o 8 de los pines de datos y conectar optativamente a tierra uno de los pines de control (específicamente R/W), lo que permite ahorrar el número de pines del microcontrolador.

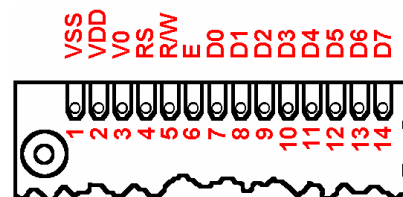


Figura 3-35. Pines del LCD

3.5.2 TECLADO

Se utiliza un teclado matricial 4x4 (cuatro filas, cuatro columnas) que se conectan a 8 pines del microcontrolador. Se agregarán cuatro resistencias de pull-up a los pines del microcontrolador que controlen a las filas o las columnas (a elección del programador).

¹⁵ Usualmente se suman dos pines para la iluminación del LCD mediante LEDs, comúnmente llamado "backlight" o luz de fondo.

3.5.3 FUENTE DE ALIMENTACIÓN

Para alimentar con 3.3V al microcontrolador y al transceiver RF, y con 5V al LCD; se regula el voltaje partiendo de una entrada de 9V provista por una batería o una fuente del mismo voltaje.

3.6 HERRAMIENTAS DE DESARROLLO Y EVALUACIÓN

Para el desarrollo del proyecto, se ha valido de diferentes herramientas de hardware para la implementación, programación, depuración del sistema. A continuación se describen e indican su importancia dentro del proyecto.

3.6.1 KIT DE DESARROLLO PICDEM Z

El kit de evaluación PICDEM Z está diseñado para permitir a los desarrolladores experimentar y crear aplicaciones con las herramientas Microchip para el protocolo Zigbee. Cada nodo del kit consiste de dos tarjetas – una madre y otra de RF. La tarjeta madre está diseñada para soportar diferentes tipos de transceivers.

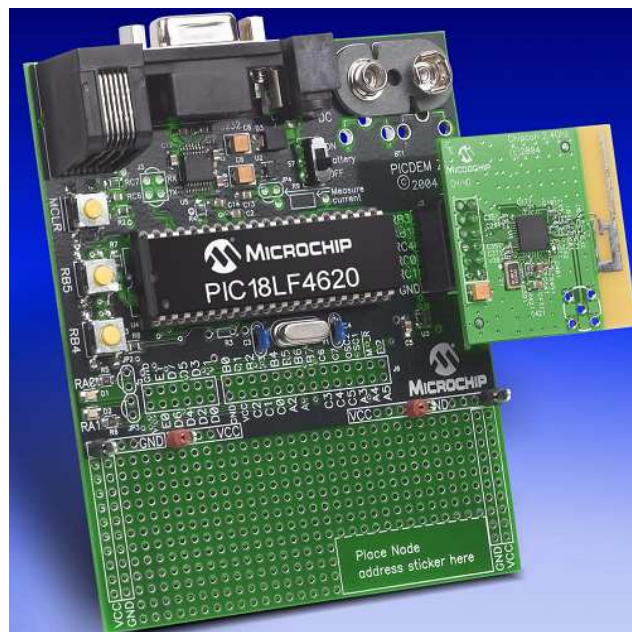


Figura 3-36. Nodo PICDEM Z

Para la implementación del coordinador se utiliza una de las dos tarjetas madre del kit de desarrollo, ya que dispone de los elementos necesarios para el funcionamiento y depuración de la aplicación: microcontrolador PIC 18LF4629, conector para la tarjeta RF, interfaz para conexión serial (DB9), fuente regulada para la alimentación, y conector ICD (In-Circuit Debugger) para la programación del PIC en el propio circuito.

3.6.2 PROGRAMADOR/DEPURADOR MPLAB ICD 2

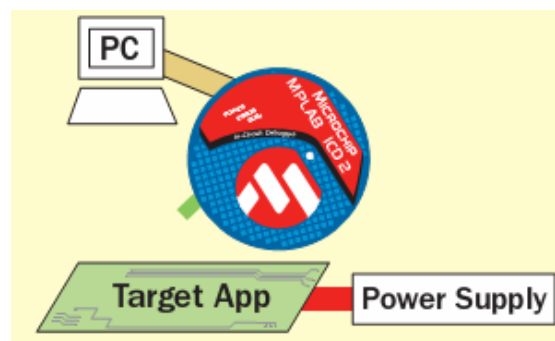


Figura 3-37. Conexión del programador MPLAB ICD2

Existen en el mercado, una gran variedad de hardware de programación¹⁶ para cargar el código fuente a los microcontroladores PIC. Sin embargo, muy pocos de ellos son útiles para programar aquellos de la familia 18, y mucho menos el microcontrolador PIC 18LF4620 (debido a la gran cantidad de memoria de programa que dispone)

Por ello, se optó por el programador MPLAB ICD¹⁷ 2 de MICROCHIP que permite cargar el código de máquina sin necesidad de desmontar el PIC del circuito y además tiene la ventaja de ayudar a la depuración del código al permitir la ejecución paso a paso del mismo.

¹⁶ Advertencia: La mayoría de programadores de PIC's comercializados libremente o presentados en el Internet están enfocados solo para trabajar con modelos de la familia 16 o modelos de la familia 18 con menor cantidad de memoria y número de instrucciones como el 18F4620.

¹⁷ ICD (In-Circuit Debugger) describe la capacidad de depurar el código mediante la ejecución controlada del código guardado en el microcontrolador, sin retirarlo del circuito de la aplicación.

Para su control, esta herramienta se comunica con un ordenador que utiliza el software de entorno de desarrollo MPLAB IDE v7.30. La conexión al computador se realiza mediante el interfaz USB (opcional RS-232).

Para la interacción entre el ICD 2 y los nodos prototipos, se requieren conectar 2 pines de I/O del PIC (PGC y PGD); adicionalmente se necesitan de conexiones a los dos pines de alimentación (VDD y VSS) y uno a la entrada del MCLR o VPP.

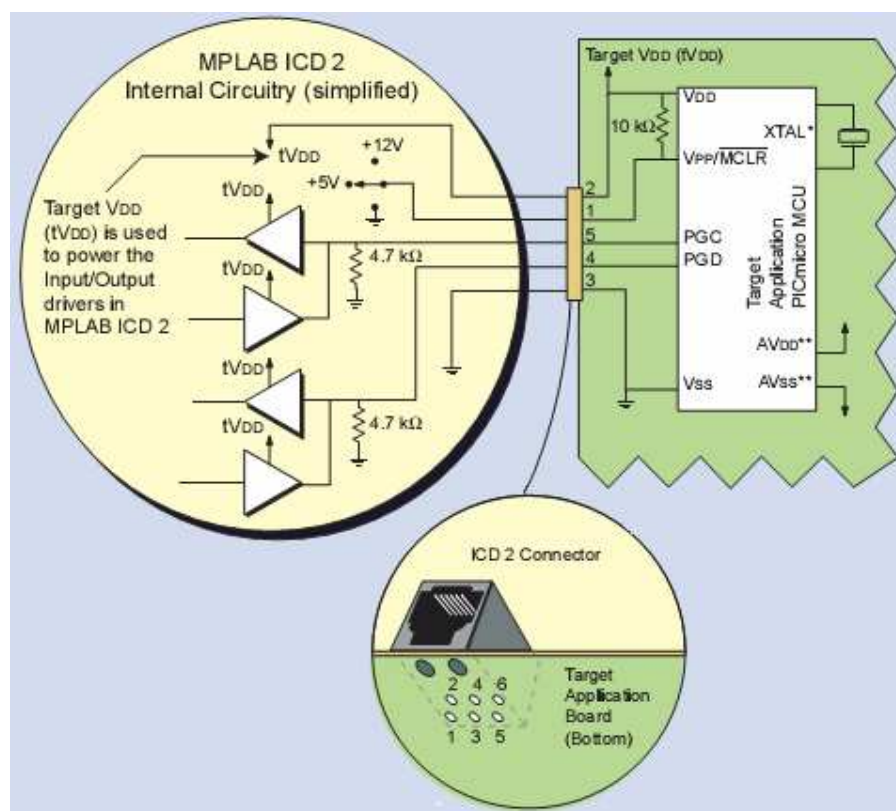


Figura 3-38. Interfaz del Programador MPLAB ICD2

3.6.3 ANALIZADOR/SNIFFER IEEE 802.15.4

Para el monitoreo del funcionamiento de la red, se utiliza el analizador de paquetes "IEEE 802.15.4 Sniffer for PIXIE & PICDEM Z" de la empresa FlexiPanel Ltd. Este analizador es gratuito y basa su funcionamiento en el Stack Zigbee de Microchip y el kit de desarrollo PICDEM Z.

El analizador consiste en el código de máquina para un nodo Zigbee PICDEMZ y el programa para ser ejecutado en un ordenador (SO Windows 9X/XP). El monitoreo requiere de la conexión serial RS-232 (DB9) entre el nodo PICDEMZ y el computador.

El analizador se encarga de establecer las redes que funcionan en los diferentes canales RF; permite en uno de los canales, visualizar los datos (cabecera y payload) de cada uno de las tramas/paquetes/mensajes de cada capa Zigbee. Adicionalmente, se añade información de la potencia de la señal recibida por el nodo utilizado como sniffer.

Con toda esta herramienta, el desarrollador puede comprobar el buen funcionamiento de la red y hallar o detectar fallas que se provoquen en cualquiera de las capas de la arquitectura IEEE 802.15.4/Zigbee.

Type	Encr	Pnd	Ack	Seq	DstPAN	DstAdd	SrcPAN	SrcAdd					
Cnd	No	No	No	E5	FFFF	FFFF	FFFF	0004A30000000066	Orphan Notification				
Type	Encr	Pnd	Ack	Seq	DstPAN	DstAdd	SrcPAN	SrcAdd	Coordinator	PAN ID	My Add	Chan	Your Add
Cnd	No	No	Yes	C2	FFFF	0004A30000000066	3D5F	0004A30000000054	Realignment	3D5F	0000	0C	796F
Type	Encr	Pnd	Ack	Seq									
Ack	No	No	No	C2									
Type	Encr	Pnd	Ack	Seq	DstPAN	DstAdd	SrcPAN	SrcAdd					
Cnd	No	No	Yes	E6	3D5F	0000	Same	796F	Data Request				
Type	Encr	Pnd	Ack	Seq									
Ack	No	Yes	No	E6									
Type	Encr	Pnd	Ack	Seq	DstPAN	DstAdd	SrcPAN	SrcAdd					
Data	No	No	No	C3	3D5F	796F	Same	0000	Type Empty				

Figura 3-39. Resultados presentados por el Analizador

3.7 DIAGRAMAS CIRCUITALES

3.7.1 TARJETA MADRE

3.7.1.1 Coordinador

Como se señaló, para el nodo coordinador se recurre a la tarjeta madre del Kit PICDEM Z de la MICROCHIP cuyo diagrama se muestra en las figuras 3-12 y 3-13.

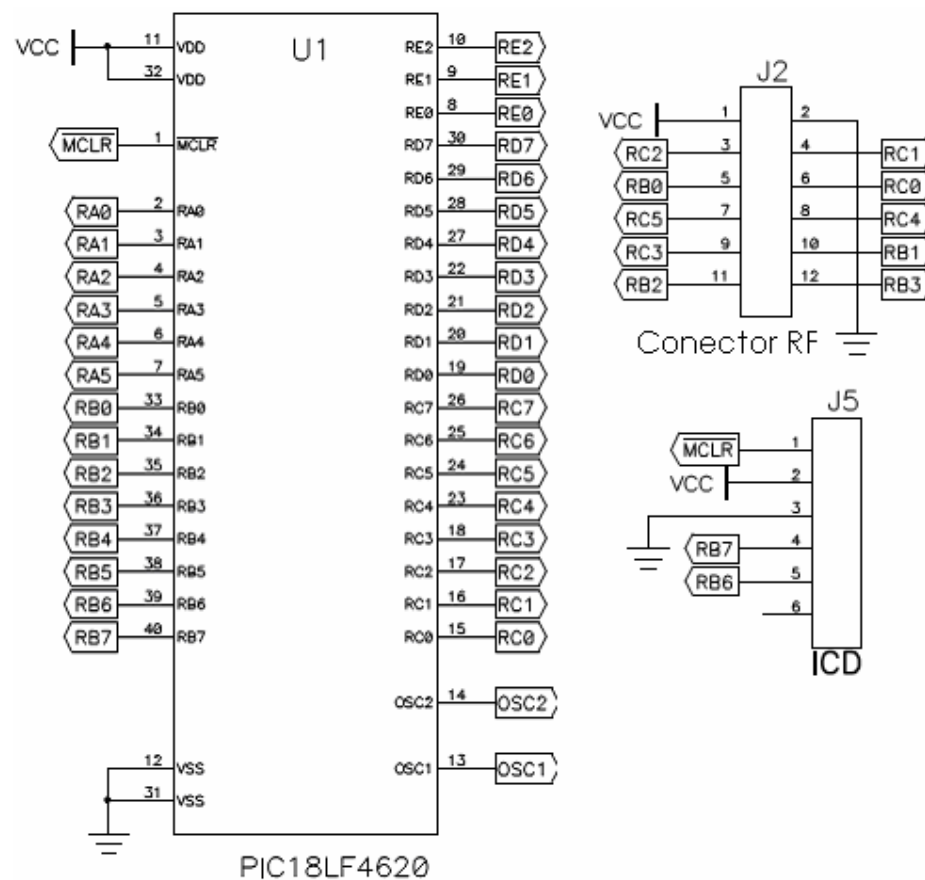


Figura 3-40. Tarjeta Madre Coordinador

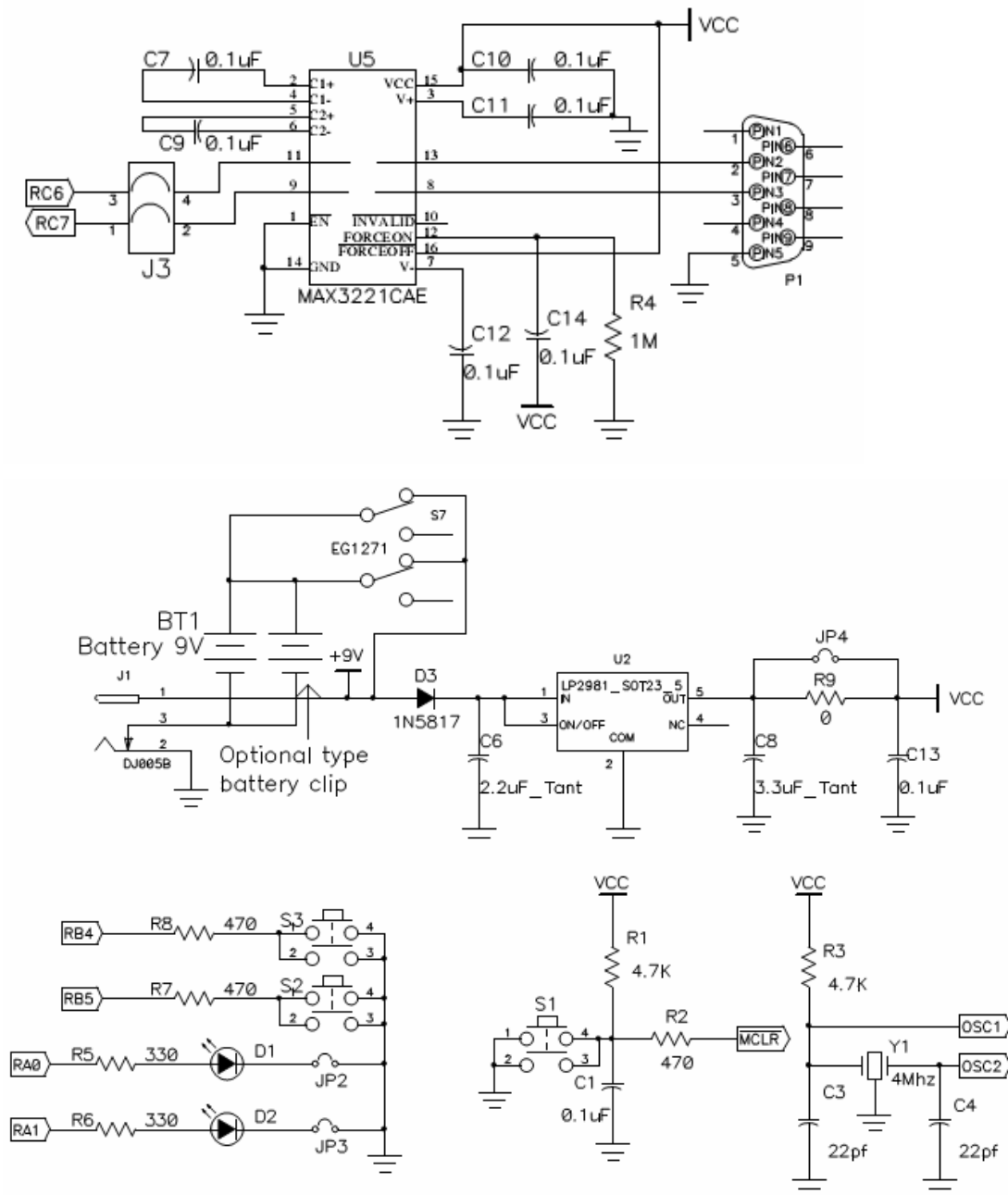


Figura 3-41. Tarjeta Madre Coordinador (continuación)

Tabla 3-6 Componentes Tarjeta Madre del Coordinador (PICDEMZ)

Reference	Description	Vendor	Vendor P/N
D3	Diode Schottky 20V 1A SMD MELF	Diodes Inc.	1N5817M-13
BT1	Conn Batt Male 9V Horz Snap-on	Keystone Electronics	593
BT1	Conn Batt Fem 9V Horz Snap-on	Keystone Electronics	594
	Conn PC Vert 9V Snap-on	Keystone Electronics	968
C3, C4	22PF 100V 5% Monolith Cerm Cap	Panasonic - ECG	ECU-S2A220JCA
C1, C2, C5, C7, C9, C10, C11, C12, C13, C14	Cap .1UF 16V Ceramic X7R 0805	Panasonic - ECG	ECJ-2VB1C104K
C6	Capacitor Tant 2.2UF 25V 10% SMD	Kemet	T491B225K025AS
C8	Capacitor Tant 3.3UF 16V 10% SMD	Kemet	T491B335K016AS
Y1	Crystal 4.000 MHZ 20PF HC-49/US	ECS Inc.	ECS-40-20-4
P1	DB9 F		
J1	Conn Powerjack Mini .1" R/A PCMT	Switchcraft Inc.	RAPC712
J3			
J2	2 x 6 .100" Socket/Terminal	Samtec	LST-106-07-F-D
JP2, JP3, JP4			
D1, D2	LED Thin 565NM Grn Diff 0805 SMD	Lumex Opto	SML-LXT0805GW-TR
U2	IC Reg LDO Micropower SOT23-5	National Semiconductor	LP2981AIM5-3.3
U5		Maxim	MAX3221CAE
U1	28-pin Socket	Mill-Max	110-99-328-41-001
U4	40-pin Socket (needs to have no internal ribs)	Mill-Max	110-99-640-41-001
U4	PICmicro [®] MCU	Microchip	PIC18LF4620-I/P
R3	No Load		
R5, R6	Res 330 OHM 1/8W 5% 0805 SMD	Yageo America	9C08052A3300JLHFT
R2, R7, R8	Res 470 OHM 1/8W 5% 0805 SMD	Yageo America	9C08052A4700JLHFT
R1	Res 4.7K OHM 1/8W 5% 0805 SMD	Yageo America	9C08052A4701JLHFT
R4	Res 1.0M OHM 1/8W 5% 0805 SMD	Yageo America	9C08052A1004JLHFT
J5	Conn Mod Jack 6-6 R/A PCB 50AU	AMP/Tyco	520470-3
S1, S2, S3	Switch Tact 6MM SMD MOM 230GF	Omron Electronics	B3S-1002
S7	Switch Slide SPDT PC MNT L=2MM	E-Switch, Inc.	EG1271
U3	IC Sensor Thermal SPI 3.3V SOT235	Microchip	TC77-3.3MCTTR
	Test Point PC Multi Purpose Blk	Keystone Electronics	5011
	Test Point PC Multi Purpose Red	Keystone Electronics	5010

3.7.1.2 Terminal

La figura 3-14 muestra el diagrama de la tarjeta madre utilizada para la implementación de los nodos terminales.

Tabla 3-7. Componentes tarjeta madre del Terminal

Referencia	Descripción	Referencia	Descripción
BT1	Conector batería 9V	J4	Teclado
C3,C4	Capacitores cerámicos 33pF	J5	Conector RJ11/ICD2
D1,D2	LED	R1-R9	Resistencia
D3	Diodo zéner 3.3V	RP	Pack resistencias x8
J1	Conn Powerjack Mini .1" R/A PCMT	S1, S2, S3	Pulsadores

J2	2 x 6 .100" Socket Samtec	U1	PIC MCU 18LF4620
J3	LCD	U2	Regulador LM7805
Y1	Cristal 4 MHz		

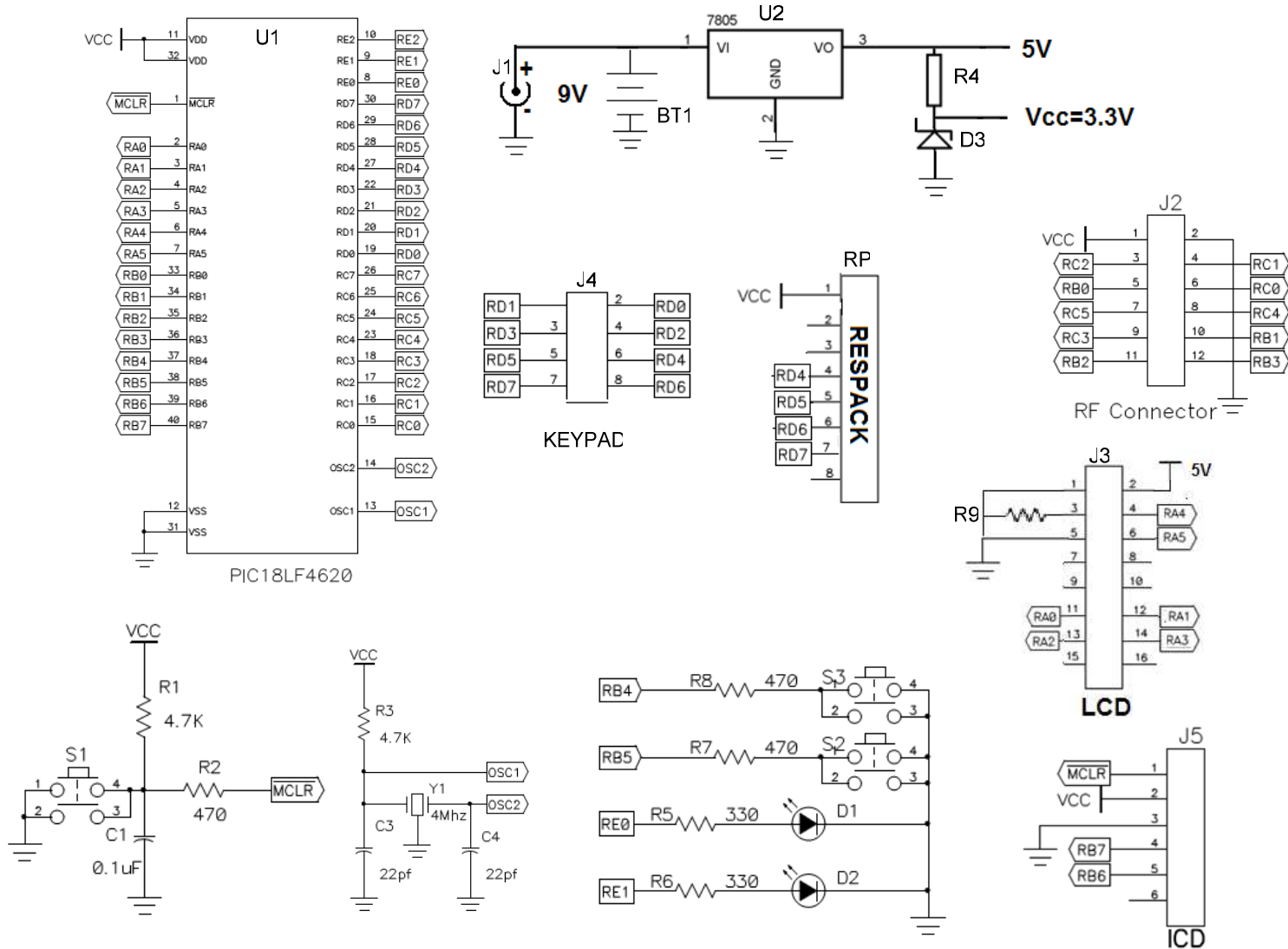


Figura 3-42. Tarjeta Madre Terminal Zigbee de Votación

3.7.2 TARJETA RF

Se utiliza para el coordinador y los terminales, la tarjeta PICDEM RF basada en el transceiver Chipcon CC2420 disponible en el kit de desarrollo de la Microchip. El diagrama de la tarjeta se detalla en la figura 3-15.

Tabla 3-8. Tarjeta RF PICDEMZ/CC2420

Reference	Description	Vendor	Vendor P/N
C1	Capacitor TANT 2.2UF 25V 10% SMD	Kemet	T491B225K025AS
C61, C81	CAP Ceramic .5PF 50V NP0 0402	Yageo America	0402CG508C9B200
C63	CAP Ceramic 5.6PF 50V NP0 0402	BC Components	0402N5R6D500NT
C62			
C381, C391	CAP Ceramic 22PF 50V NP0 0402	BC Components	0402N220J500NT
C171, C371, C441, C481	CAP 68PF 50V Ceramic 0402 SMD	Panasonic - ECG	ECJ-0EC1H680J
C101	CAP 10000PF 16V Ceramic X7R 0402	Kemet	C0402C103K4RACTU
C11, C71, C251, C261, C351	CAP .10UF 10V Ceramic X5R 0402	Kemet	C0402C104K8PACTU
C421, C431	CAP 10UF 6.3V Ceramic X5R 0805	Panasonic - ECG	ECJ-2FB0J106M
U1	CC2420 Single-chip transceiver	Chipcon	CC2420-STB1 QLP48
L62	Inductor 5.6NH +/-0.2NH 0402	Susumu Co Ltd	HPL1005-5N6
L61, L81	Inductor 7.5NH 570MA 0402	Murata Electronics	LQW15AN7N5J00D
R421	RES 2.00 OHM 1/8W 1% 0805 SMD	Yageo America	9C08052A2R00FGHFT
R451	RES 43.0K OHM 1/16W 1% 0402 SMD	Yageo America	9C04021A4302FLHF3
Y1	Crystal (second vendor)	Crystek	CSX3-AA-1816.000
Y1	Crystal	TOYOCOM	TSX-10A 16M 16pf
J2	.100" Socket/Terminal	Samtec	LST-106-07-F-D
P5	Conn Recept Straight PCB .110" G	Johnson Components	142-0701-231

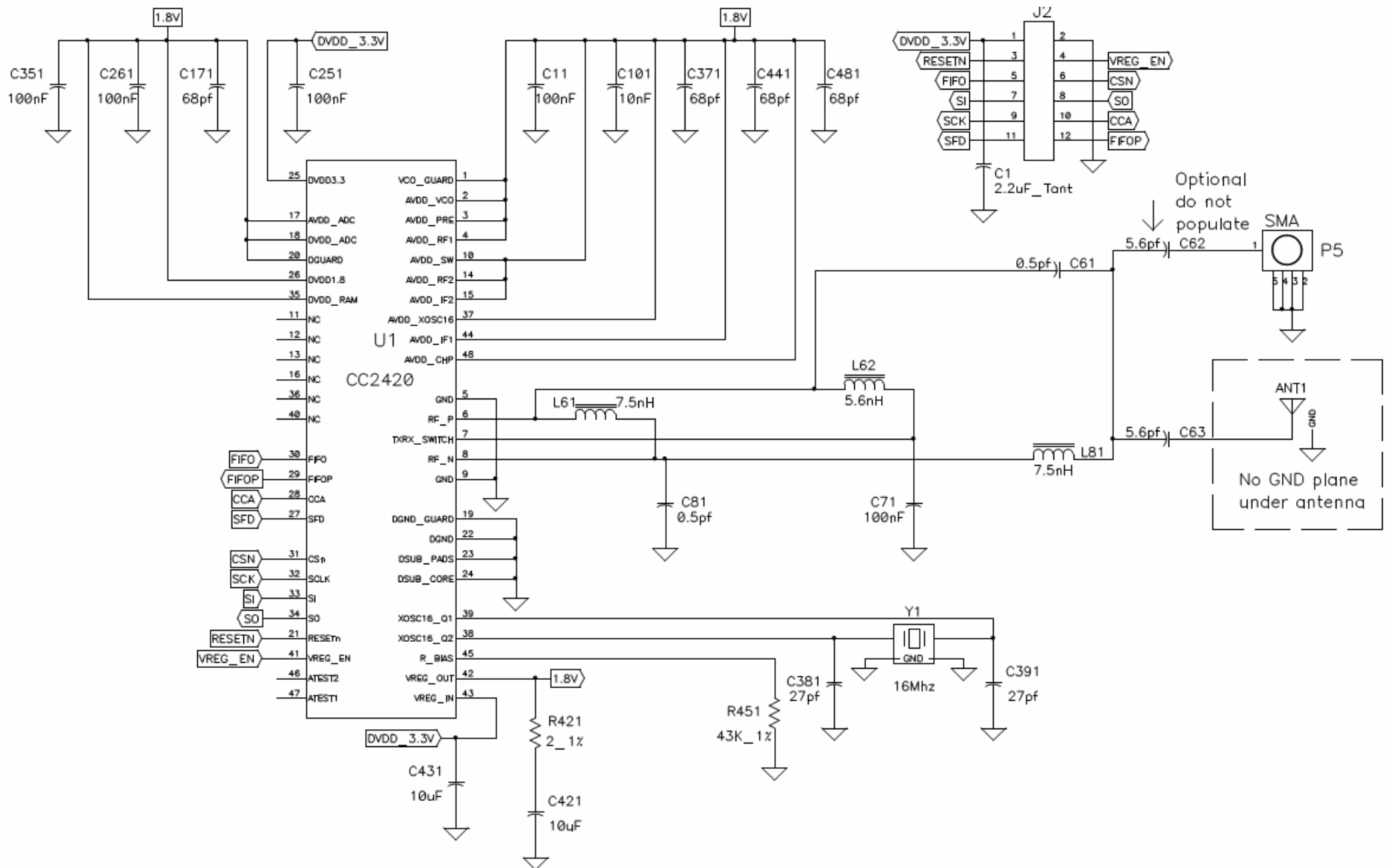


Diagrama 3-43. Tarjeta RF PICDEM Z-CC2420

3.8 ANALISIS DE COSTOS

Los precios descritos en las tablas del 3-6 al 3-8 exponen los costos de los elementos, los dispositivos, y las herramientas que se adquirieron para construir cada nodo. La tabla 3-9 muestra los valores de las obligaciones arancelarias, impuestos de ley y costos de transporte para importar los dispositivos requeridos. Finalmente, la tabla 3-10 expone el costo total del sistema prototipo para el sufragio electrónico.

Tabla 3-9. Costos de un nodo coordinador

COMPONENTE	CANT.	COSTO UNITARIO	SUBTOTAL
TARJETA MADRE PICDEMZ*	1	80.00**	80.00
TARJETA RF PICDEMZ CHIPCON CC2420*	1	40.00**	40.00
FUENTE DE ALIMENTACIÓN 9V	1	5.00	5.00
TOTAL COORDINADOR			125.00

*Se adquirió el KIT PICDEMZ formado por dos nodos por \$199.99.

**Precios de componentes adquiridos en Estados Unidos mediante la empresa Mouser inc. (www.mouser.com)

Tabla 3-10. Costos de un nodo terminal

COMPONENTE	CANT.	COSTO UNITARIO	SUBTOTAL
PCB DOBLE LADO	1	45.00	45.00
PIC 18LF4620	1	8.90	8.90
TARJETA RF PICDEMZ CC2420	1	40.00	40.00
LCD 2X20	1	26.00	26.00
Teclado Matricial 4X4	1	8.90	8.90
Cristal 4MHz	1	0.75	0.75
Pulsadores	3	0.25	0.75
LED	2	0.25	0.50

Resistencias	9	0.05	0.45
Regulador LM7805	1	0.60	0.60
Diodo ZENNER 3.3V	1	0.20	0.20
Conector BATERIA	1	0.40	0.40
Conector FUENTE	1	0.60	0.60
Conector RJ11 ICD2	1	0.75	0.75
TOTAL TERMINAL			124.90

**Precios de componentes adquiridos en Estados Unidos mediante la empresa Mouser inc. (www.mouser.com)

Tabla 3-11. Costos de herramientas adicionales

Dispositivo	Cantidad	Valor Unitario	Subtotal
Programador ICD2**	1	130.00	130.00
TOTAL ADICIONALES		130.00	130.00

**Precios de componentes adquiridos en Estados Unidos mediante la empresa Mouser inc. (www.mouser.com)

Tabla 3-12. Costos de Importación: impuestos y transporte

DETALLE	VALOR
SUBTOTAL ELEMENTOS IMPORTADOS	404.50
<ul style="list-style-type: none"> • 1 Kit PICDEM Z (2 nodos) • Tarjeta RF PICDEM Z • 5 Microcontroladores PIC18LF4620 • Programador MPLAB ICD2. 	
IMPUESTOS ADUANAS (10%)	40.45
IVA (12%)	48.54
TRANSPORTE/BODEGAJE/TRÁMITES	40.00
<ul style="list-style-type: none"> • Empresas: FEDEX/TRANEXPRESS • Cantidad: 2 Paquetes • Peso: 4 libras c/u 	
TOTAL IMPORTACIÓN	128.99

Tabla 3-13. Costo total de la red prototipo

Dispositivo	Cantidad	Valor Unitario	Subtotal
Nodo Coordinador	1	125.00	125.00
Nodo Terminal	2	124.90	249,80
Programador ICD2	1	130.00	130.00
Importación			128.99
TOTAL ADICIONALES			633.79

De los costos descritos, se observa que el valor de cada nodo prototipo Zigbee para nuestro proyecto se halla en alrededor de \$130.00. A este costo se debe sumar el precio de un programador cuyo precio supera los \$100.

Se debe tomar en cuenta que Ecuador al no ser nuestro país productor de dispositivos electrónicos y el escaso mercado del diseño provoca que los precios a nivel interno sean extremadamente altos. A esto se suman, los impuestos, los aranceles y el transporte que agregan cerca del 30% del total del costo, lo cual desmotiva el diseño de soluciones para el mercado masivo y limitan a crear aplicaciones personalizadas para la industria.

Diseño del Software de Comunicación de Datos

PROGRAMA FUENTE DE LOS
MICROCONTROLADORES.

SOFTWARE DEL ORDENADOR.

SEGURIDADES.

4 CAPITULO 4

DISEÑO DEL SOFTWARE DE COMUNICACIÓN DE DATOS

El presente capítulo detalla el proceso de diseño del software, requerido para el funcionamiento y control del sistema de sufragio electrónico. Adicionalmente, se describen las soluciones de seguridad implementadas en el software.

El software del proyecto se compone del código fuente desarrollado para los microcontroladores PIC presentes en el coordinador y los terminales; y del código escrito para el programa de administración de datos en el ordenador.

4.1 DISEÑO DEL PROGRAMA FUENTE DE LOS MICROCONTROLADORES

4.1.1 HERRAMIENTAS PARA LA PROGRAMACIÓN

Cada microcontrolador necesita de un programa que lo instruya sobre los diferentes procesos y decisiones a tomar. El programa o “código de máquina”, denominado así por hallarse escrito en formato binario, se compone de las instrucciones de operación del microcontrolador y es cargado en la memoria de este mediante un dispositivo programador.

Recurriendo a un lenguaje de programación estructurado, se puede generar códigos sencillos y de fácil entendimiento para el programador, que luego serán “traducidos” al lenguaje binario que utiliza el microcontrolador. La mayoría de lenguajes utilizados en ordenadores han sido adaptados para programar microcontroladores, como por ejemplo lenguaje C y BASIC.

En seguida, se justifica la selección y utilización del lenguaje de programación, y se describe brevemente las funciones de las herramientas necesarias para generar el código de cada nodo de la aplicación.

4.1.1.1 Lenguaje de programación

El desarrollo del código de los microcontroladores PIC se realiza en lenguaje C, debido a que libera al programador de realizar análisis a bajo nivel, y por las librerías disponibles en este lenguaje para desarrollar Zigbee y controlar diferentes periféricos existentes.

Pese al mayor consumo de memoria de programa que se requiere en comparación a utilizar el lenguaje ensamblador¹⁸, los PIC de la familia 18 están optimizados para el uso del lenguaje C.

Las principales características de este lenguaje son:

- ✚ Programación estructurada.
- ✚ Economía en las expresiones.
- ✚ Abundancia en operadores y tipos de datos.
- ✚ Codificación en alto y bajo nivel simultáneamente.
- ✚ Reemplaza ventajosamente a la programación en ensamblador.
- ✚ Utilización natural de las funciones primitivas del sistema.
- ✚ No está orientado a ningún área en especial.
- ✚ Producción de código objeto altamente optimizado.
- ✚ Facilidad en su aprendizaje.

¹⁸ El lenguaje ensamblador es el lenguaje de programación de más bajo nivel, permite trabajar directamente con el juego de instrucciones disponibles en el microcontrolador/microprocesador.

4.1.1.2 Entorno de desarrollo

Como centro de edición del proyecto, se recurre a el programa MPLAB IDE versión 7.30 (para MS Windows 9X o superior), que permite desarrollar aplicaciones basadas en microcontroladores Microchip.

Es denominado un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE), porque provee un único “ambiente “para el desarrollo del código, manejo del compilador, enlazamiento de archivos, generación del código máquina y la utilización de los programadores y/o depuradores como es el caso del MPLAB ICD2.

Resumiendo, MPLAB IDE provee las siguientes funcionalidades:

- ✚ Crear y editar el código fuente usando el editor incorporado.
- ✚ Ensamblar, compilar y enlazar el código fuente.
- ✚ Depurar el flujo del programa mediante un simulador incorporado, o en tiempo real mediante emuladores y depuradores conectados al circuito.
- ✚ Realizar medidas de tiempo utilizando el simulador o el emulador.
- ✚ Observar las variables del programa en la ventana de observación “Watch”.
- ✚ Programar el firmware en los dispositivos mediante programadores.

4.1.1.3 Compilador

Un compilador es el traductor del lenguaje de programación al código de máquina manejado por un microcontrolador o microprocesador.

Para la compilación del código se utiliza el programa MPLAB C18¹⁹ versión 3.02 de Microchip, el cual convierte las sentencias C en código de máquina para un PIC de la familia 18. Este compilador soporta las expresiones y tipos de variables definidas en el estándar ANSI para este lenguaje, excepto en puntos donde existen conflictos con la eficiencia de los microcontroladores PIC. Adicionalmente, el compilador MPLAB C18 se integra con MPLAB IDE para facilitar la administración de proyectos.

¹⁹ Esta herramienta tiene costo, sin embargo, existe una versión estudiantil gratuita con limitación de 60 días en su uso.

En la tabla 4-1 se resumen las herramientas de Microchip útiles para la edición, compilación y enlazamiento del código para la aplicación Zigbee, así como la programación del PIC 18LF4620.

Tabla 4-14. Herramientas utilizadas para la programación del proyecto.

HERRAMIENTA²⁰	DESCRIPCIÓN	COSTO
MPLAB IDE v7.30	Entorno de Desarrollo. Concentra las herramientas Microchip de forma amigable.	Gratis
MPLAB C18 v3.02	Compilador Lenguaje C para PIC 18.	Gratis en versión estudiantil por 60 días
MPLINK/MP2COD/MP2HEX	Enlazador. Generador del código máquina.	Gratis. Incluido con MPLAB IDE
Microchip Software Stack v3.5 for Zigbee 1.0	Librería para la implementación de Zigbee en μ C PIC 18	Gratis
ZENA Demo Version 1.0 ²¹	Genera los archivos de configuración del Stack.	DEMO gratuito, incluido con el Stack.
Application Maestro 1.0	Conjunto de librerías de funciones para control de periféricos (entre ellos el LCD).	Gratis.

²⁰ Para obtener una copia y ayuda de las herramientas de desarrollo de Microchip, acceda al sitio www.microchip.com.

²¹ El demo tiene como limitante no incluir características de depuración como analizador, los cuales se incluyen al adquirir el hardware ZENA comercializado por Microchip.

MPLAB ICD2	Programador/Depurador de μC PIC	\$159.99
-------------------	---	-----------------

4.1.2 STACK ZIGBEE DE MICROCHIP

El Stack Zigbee de Microchip²² consiste de múltiples archivos fuentes que siguen la arquitectura del protocolo Zigbee y el estándar IEEE 802.15.4, organizando cada capa en su propio archivo, dentro de los cuales cada término o variable utilizado es tomado de las especificaciones.

La principal ventaja de dicha organización es la independencia²³ del código de cada una de las capas, logrando que el desarrollador concentre su esfuerzo en la creación de aplicaciones. Por ello, las configuraciones de las capas inferiores son efectuadas de forma sencilla mediante el programa ZENA DEMO V1.0, incluido con los archivos del Stack Zigbee, el cual genera los archivos en función de los requerimientos de la aplicación.

4.1.2.1 Funcionamiento

El stack se encuentra desarrollado en lenguaje C, y está diseñado para compilarse mediante MPLAB C18 y ejecutarse en microcontroladores PIC de la familia 18. Utiliza memoria interna de programa tipo FLASH para guardar una gran cantidad de parámetros, incluyendo dirección MAC, tabla de vecindades y tabla de relaciones (bindings). El Stack está diseñado para correr en el Kit de desarrollo PICDEM Z. Sin


²² Consulte el documento AN965 (Microchip Stack for the Zigbee Protocol) y analice el proyecto ejemplo, ambos incluidos con el paquete de instalación del Stack.

²³ Un ejemplo de esta característica, es poder utilizar cualquier transceiver RF soportado sin alterar el código de aplicación. Se requiere utilizar el programa ZENA para generar el archivo de configuración que refleje este cambio en la capa IEEE 802.15.4

embargo, puede ser trasladado fácilmente a cualquier hardware equipado con un microcontrolador PIC compatible y el transceiver RF soportado.

La ejecución del stack y su código se los organizan mediante primitivas o estados, especificados en el estándar Zigbee/IEEE 802.15.4, que permiten el acceso a los servicios más importantes para realizar procesos como formación de la red, transmisión y recepción de comandos y datos.

Las primitivas Zigbee utilizadas se clasifican en:

 Primitivas de petición:

Utilizadas por el stack con el objeto de realizar los diferentes procesos de comunicación (formar la red, enviar datos, establecer relaciones, descubrir direcciones, etc.). En el stack se implementa cada una de estas primitivas, el desarrollador sólo es responsable de llamarlo y configurar previamente los valores necesarios para que el Stack la procese.

 Primitivas de respuesta/indicación:

Son utilizadas por el stack para entregar una contestación a una petición o para indicar la recepción de información. El desarrollador es responsable de implementar el código necesario para procesar los datos o la respuesta recibida para proseguir o corregir errores si es necesario.

 No Primitive:

En este estado el stack no realiza ningún proceso Zigbee, es utilizada por el desarrollador para preparar la próxima primitiva de tipo petición y cargar los valores que se necesiten en los registros requeridos para su ejecución.

Tabla 4-15. Lista de primitivas Zigbee comunes

Primitivas de Petición ²⁴	Primitivas de Respuesta	Descripción
--------------------------------------	-------------------------	-------------

²⁴ APSDE: Servicios de transporte de datos de la subcapa APS a la AF.

APSME: Servicios de transporte de comandos para administración de la subcapa APS a la AF

APSDE_DATA_request	APSDE_DATA_confirm	Para enviar datos a otros dispositivos
APSME_BIND_request	APSME_BIND_confirm	Obliga a crear un enlace o binding.
APSME_UNBIND_request	APSME_UNBIND_confirm	Obliga a eliminar un enlace o binding.
NLME_NETWORK_DISCOVERY_Request	NLME_NETWORK_DISCOVERY_confirm	Descubre las redes disponibles para unirse.
NLME_NETWORK_FORMATION_request	NLME_NETWORK_FORMATION_confirm	Inicia una red en uno de los canales especificados.
NLME_PERMIT_JOINING_request	NLME_PERMIT_JOINING_confirm	Permite a otros nodos unirse a la red como esclavos.
NLME_START_ROUTER_request	NLME_START_ROUTER_confirm	Inicializa las funcionalidades de ruteo. (Solo Routers)
NLME_JOIN_request	NLME_JOIN_confirm	Intenta unirse o volver a una red especificada.
NLME_DIRECT_JOIN_request	NLME_DIRECT_JOIN_Confirm	Añade un dispositivo como esclavo
NLME_LEAVE_request	NLME_LEAVE_confirm	Dejar la red o forzar a un esclavo a dejarla
NLME_SYNC_request	NLME_SYNC_confirm	Petición de mensajes guardados por el dispositivo padre. Solo RFD
ZDO_END_DEVICE_BIND_req	APSDE_DATA_indication	Solo puede ser utilizado por dispositivos que soportan binding

4.1.3 CREACIÓN DE APLICACIONES BASADOS EN EL STACK MICROCHIP

Para desarrollar una aplicación Zigbee basado en las herramientas ya descritas se debe seguir el siguiente procedimiento:

- 🔧 Obtener o crear un perfil para el proyecto.
- 🔧 Determinar la estructura de los endpoints en cada dispositivo
- 🔧 Generar archivos de configuración para capas inferiores
- 🔧 Crear el código fuente de la aplicación para cada microcontrolador
- 🔧 Compilación del Proyecto y programación en el microcontrolador.

NLME: Servicios de transporte de comandos para administración de la capa NWK a la APS

ZDO: Servicio de la capa ZDO

4.1.3.1 Creación de un perfil para el proyecto.

El perfil o profile tiene el objeto de garantizar la interoperabilidad entre dispositivos similares de diferentes fabricantes. Dicho punto no es indispensable dentro de la aplicación debido a que no es destinada para el mercado de consumo.

Por ser el proyecto una aplicación con fines de investigación, se creó un perfil no certificado²⁵ (basado en el perfil para aplicaciones de iluminación²⁶). Este perfil se desarrolló en base a la estructura de endpoints requerida (Figura 4-1)

4.1.3.2 Estructura de los endpoints en cada dispositivo

Para la organización de la aplicación se debe establecer una estructura de los endpoints u objetos con los respectivos clusters y atributos. En la figura 4-1, se detalla la estructura de endpoints que se implementó. Cada nodo, dispone de un único endpoint, un cluster bidireccional y con único atributo de tipo “string” (cadena de caracteres).

²⁵ Para la comercialización de aplicaciones se requiere certificar los productos a través de la Zigbee Alliance. Uno de los requisitos para garantizar compatibilidad requiere crear u obtener un perfil autorizado por la alianza.

²⁶ El perfil certificado de iluminación es de carácter público y se encuentra junto a los archivos del Stack Zigbee de la Microchip.

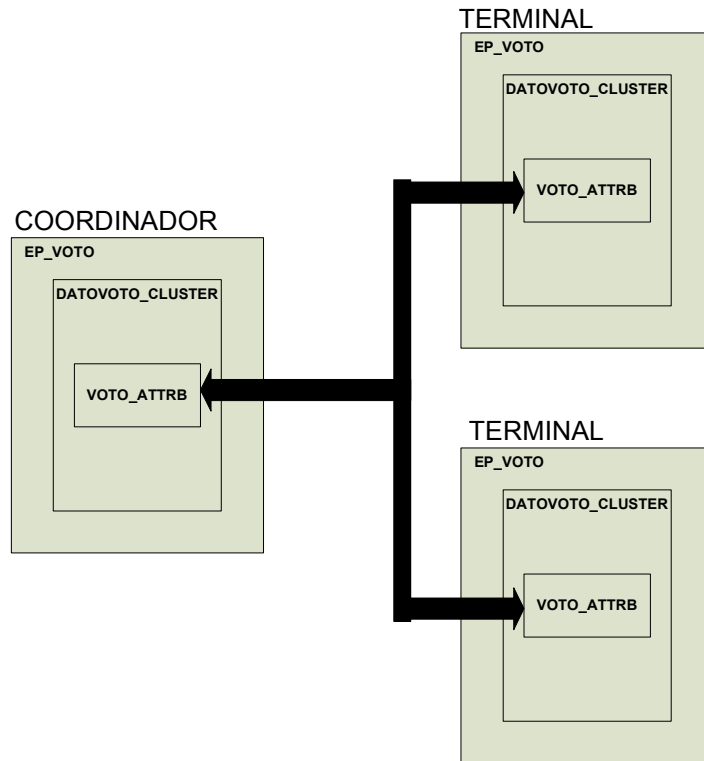


Figura 4-44. Estructura de Endpoints/clusters/Atributos del profile Voto.

4.1.3.3 Generación de archivos de configuración para capas inferiores

Se requieren de archivos de configuración para cada dispositivo, basados en el tipo de dispositivo, la configuración MAC y de red, y la estructura de endpoints necesarias. Para generarlos a través de una interfaz amigable, se utiliza el programa ZENA DEMO 1.0 que acompaña de forma gratuita a los archivos del “Stack Zigbee de Microchip”.

Las tablas 4-3 y 4-4 contienen la información indispensable generar con ello los archivos de configuración del sistema de votación con el programa ZENA

Tabla 4-16. Configuración del coordinador del proyecto

Propiedad	Valor	Descripción
MAC Address	0004A30000000054	Dirección MAC
Zigbee Device	Coordinador	Tipo dispositivo Zigbee

Type		
IEEE Device Type	FFD	Tipo dispositivo IEEE 802.15.4
Transceiver Power	Always On	El transceiver siempre escucha el canal
Power Source	Main Power	Fuente de alimentación
Tranceiver	Chipcon CC2420	Transceiver
Output Power	0 dBm	Potencia de Salida
Pin Assigments	PIC DEM Z	Pines del PIC a ser utilizados
Allowed Channels	Todos (11-26)	Canales RF manejados
PICmicro Device	PIC18LF4620	Modelo de PIC utilizado
Clock Frecuency	16 MHz	Velocidad del reloj.
Usart Baud Rate	19200 bps	Comunicación serial.
Heap Size	8 bancos RAM	Memoria multi propósito.
Stack Size	1 banco FLASH	Memoria utilizada por stack.

Tabla 4-17. Configuración de los terminales del proyecto

Propiedad	Valor	Descripción
MAC Address	0x0004A30000000066 0x0004A30000000067	Dirección MAC de cada terminal
Zigbee Device Type	End Device	Tipo de dispositivo Zigbee
IEEE Device Type	RFD	Tipo de dispositivo IEEE
Transceiver Power	On when Stimulated	Transceiver activo al ser estimulado por MCU
Power Source	Disposable Battery	Batería como fuente
Tranceiver	Chipcon CC2420	Modelo de transceiver
Output Power	0 dBm	Potencia de salida
Pin Assigments	PICDEMZ	Pines del MCU PIC utilizados
Allowed Channels	Todos (11-26)	Canales utilizados

ZDO/APS	Valores por defecto	Configuraciones capa APL: máximo número de tramas y direcciones almacenadas
NWK/MAC	Valores por defecto	Configuraciones capas NWK/MAC
PICmicro Device	PIC18LF4620	PIC a ser utilizado
Clock Frequency	16 MHz	Velocidad del reloj
Heap Size	8 bancos RAM	Memoria multi propósito.
Stack Size	1 banco FLASH	Memoria utilizada por stack.

4.1.3.4 Creación del código fuente de la aplicación.

En este punto, se desarrolla el código fuente de la aplicación. Vale recordar que el stack está compuesto de otros archivos fuente que implementan el resto de capas de la arquitectura Zigbee, incluidos los servicios de la subcapa aplicación APS (Subcapa de soporte de aplicación).

El desarrollo del programa fuente se debe partir de la función primaria **main()**, de aquí se inicializa los periféricos como LCD, puertos de entrada/salida, otros registros importantes y finalmente el Stack Zigbee.

Luego de la inicialización, se utiliza una estructura basada en la sentencia SWITCH y la función 'ZigbeeTasks' con el objeto de evaluar la siguiente primitiva Zigbee a ser ejecutada. Se puede observar en las figuras 2 y 3, que se requiere un lazo infinito [while (1)] para evaluar de forma periódica la siguiente primitiva a ser ejecutada.

La función CLRWDT no tiene relación con Zigbee y es requerida para encerrar el temporizador WDT (WatchDog Timer) que provoca que el microcontrolador se reinicie si dicho temporizador llega a desbordarse.

Figura 4-45. Estructura básica de la fuente de la aplicación.

```
while (1)
{
    CLRWDT();
    ZigBeeTasks( &currentPrimitive );

    switch (currentPrimitive)
    {
        // Include cases for each required primitive.
        // Be sure to update currentPrimitive!

        default:
            currentPrimitive = NO_PRIMITIVE;
            break;
    }
}
```

Cabe diferenciar que la función **ZigBeeTasks(¤tPrimitive)** tiene a su cargo evaluar primitivas de tipo petición (a cargo del stack). En cambio, la sentencia **SWITCH currentPrimitive** evalúa las primitivas de respuesta y No_Primitive (a cargo del desarrollador).

Después de evaluar una primitiva, el desarrollador puede ejecutar el código necesario para procesos no relacionados con Zigbee. Se debe asegurar que estos no duren largos períodos de tiempo, caso contrario se podrían perder los mensajes entrantes al saturarse el buffer de recepción.

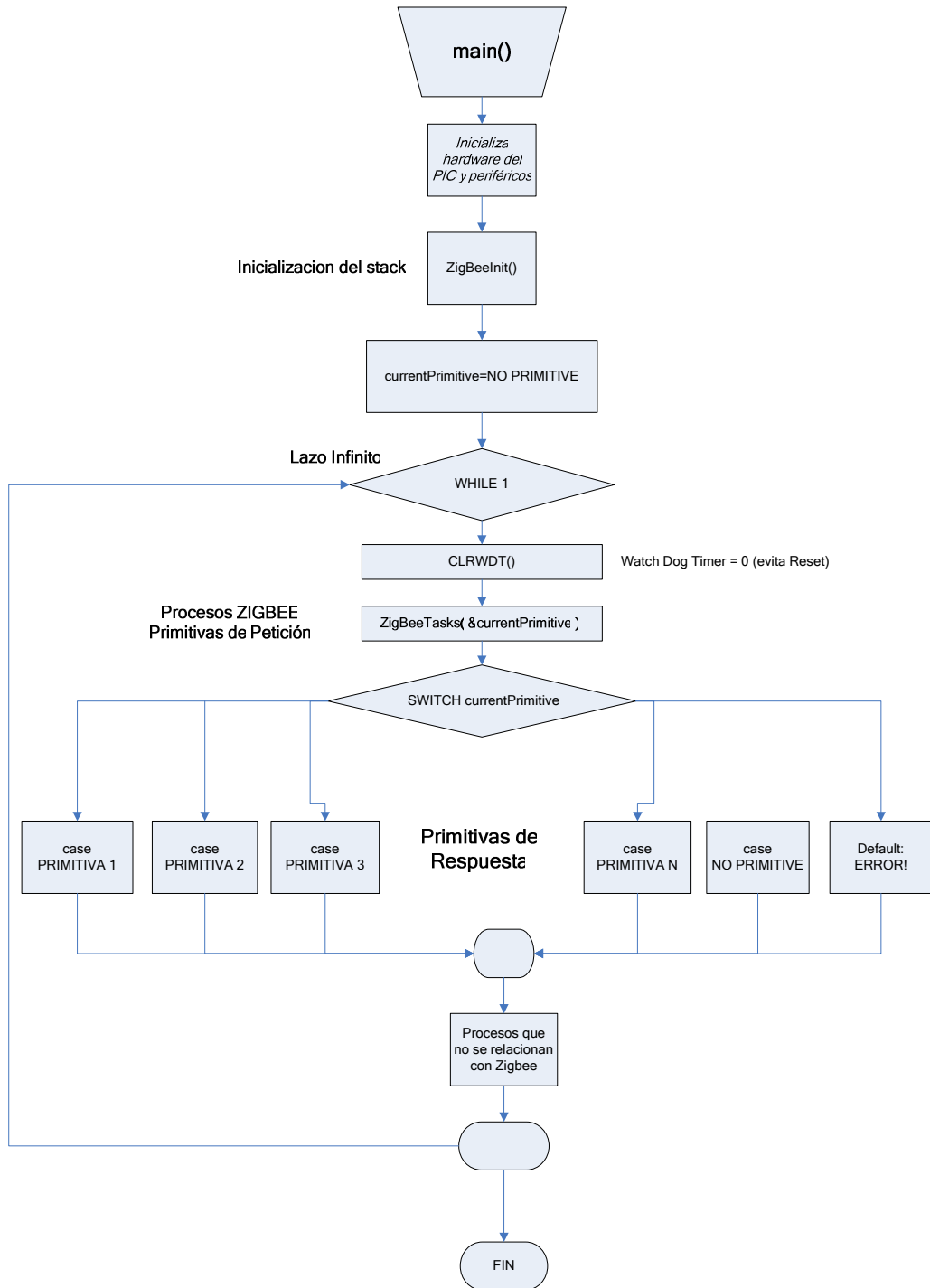


Figura 4-46. Flujo general de una aplicación basada en el Stack Zigbee de Microchip

4.1.3.5 Compilación del Proyecto y programación en el microcontrolador.

Finalmente, una vez creados los archivos con el código fuente para el proyecto, estos deberán ser compilados y enlazados (para ello se requiere indicar al programa MPLAB IDE, la ruta de las carpetas que contienen dichos archivos) para crear el respectivo código de máquina y ser cargado al microcontrolador PIC utilizando el programador MPLAB ICD 2.

4.1.4 CONTROL DE DISPOSITIVOS Y PERIFERICOS.

Una vez establecidos los elementos para la comunicación entre el microcontrolador y el transceiver RF, es necesario añadir las funciones adecuadas para controlar el resto de dispositivos.

4.1.4.1 Display LCD

Para el control del LCD, se utiliza la librería “XLCD for C Language” disponible con el software Application Maestro²⁷ 1.0 de Microchip. La librería dispone de las funciones necesarias para inicializar el display, al igual que para enviar caracteres y comandos.

Para el proyecto, se configuraron los parámetros en Application Maestro exhibidos en la tabla 4-5

Tabla 4-18. Configuración de la librería XLCD para la aplicación.

Reloj	16 MHz	Velocidad microcontrolador
Modo del interfaz	4 bit interface	Número de bits de datos transmitidos de forma

²⁷ Esta aplicación, distribuida de forma gratuita, permite configurar diferentes parámetros para generar una librería personalizada para controlar un módulo interno (convertor AD, USART, I2C), o dispositivos externos como displays LCD.

		paralela.
Número de líneas	Two	Número de líneas en el LCD
Fuente	5x8	Tipo de Fuente
Selección nibble ²⁸	Lower nibble	Selecciona el nibble del puerto I/O que se utiliza para transmitir datos.
Puerto Datos	PORTA	Selecciona el puerto I/O
LCD RS Pin	RA0	PIN I/O para controlar la línea RS del LCD
LCD EN	RA1	PIN I/O para controlar la línea EN del LCD
LCD WR	Ground	PIN I/O para controlar la línea EN del LCD. Permite conectarlo a tierra.
Blocking	YES	
Modo	Delay	Utiliza retardos o lee una bandera para controlar flujo de envíos al LCD.
Display On	Yes	Enciende el display
Cursor On	Yes	Muestra el cursor
Blink On	Yes	Cursor Intermitente

4.1.4.2 Teclado Matricial

Se implantó el archivo fuente teclado.c (y su archivo de inclusión teclado.h) que dispone de funciones que controlan el funcionamiento del teclado. La función principal de es la denominada “teclado()”, en la cual el microcontrolador espera por

²⁸ Nibble: 4 bits.

Lower nibble: 4 bits menos significativos.

High nibble: 4 bits más significativos.

la presión de una tecla y regresa el código ASCII de esta cuando una de ellas es presionada.

Tabla 4-19. Descripción de la función teclado()

teclado()	
Archivo include	teclado.h
Prototipo	unsigned char teclado (void)
Entrada	Ninguna
Valor Retornado	unsigned char con el valor ASCII de la tecla presionada
Archivos	teclado.c
Observaciones:	<p>Realiza una espera infinita hasta que se presione una tecla.</p> <p>Utiliza el puerto D, con el nibble más significativo como entrada y el otro nibble como salida.</p> <p>Requiere de una espera luego de la función, para evitar efectos de rebote²⁹.</p>

4.1.4.3 Módulo USART – Comunicación serial

El microcontrolador PIC 18LF4620 contiene un módulo USART para comunicación serial asincrónica. Para su control, se utiliza la librería “USART (Interrupt-driven)” disponible con el software Application Maestro 1.0 de Microchip. La librería dispone de las funciones necesarias para inicializar el módulo, al igual que para enviar y recibir caracteres y comandos.

Esta librería transmite y recibe datos utilizando interrupciones. Utilizando las distintas funciones, el programador puede concentrarse en desarrollar aplicaciones de alto

²⁹ Rebote: Efecto provocado por la imperfección de una señal que puede ser confundida por varios estados lógicos en lugar de uno solo.

nivel, en lugar de preocuparse de activar o desactivar bits de los registros que controlan el módulo USART.

La librería utiliza un buffer de recepción en los cuales se cargan los datos recibidos. Por ello, el desarrollador no debe preocuparse de la recepción de cada byte, sino de leer el buffer una vez que ha recibido un número determinado de ellos.

4.1.5 ANÁLISIS DEL CÓDIGO FUENTE PARA EL SISTEMA DE VOTACIÓN

Una vez que se han explicado las bases necesarias, se describe a continuación el código fuente de las funciones que controlan el funcionamiento de cada uno de los nodos Zigbee.

4.1.5.1 Coordinador.

El código del programa del coordinador se divide en tres etapas claramente definidas: inicialización, procesos Zigbee y etapa de aplicación.

4.1.5.1.1 Inicialización.

En esta etapa se configuran los puertos del microcontrolador, se inicializa el “stack Zigbee”.

4.1.5.1.2 Etapa Zigbee.

Aquí se procesan cada una de las primitivas Zigbee en la capa APL/APS. Las primitivas más importantes para el programador son *DATA_INDICATION* y *NO_PRIMITIVE* los cuales permiten procesar respectivamente los datos recibidos y preparar el servicio para el proceso de envío.

Tabla 4-20.Principales primitivas Zigbee utilizadas en el código fuente del coordinador

Paso	Descripción
DATA_INDICATION	Recibe notificación de la recepción de datos.

NO_PRIMITIVE

Permite preparar y llamar a las primitivas de petición para la formar la red (NETWORK FORMATION request) y para enviar datos (DATA request).

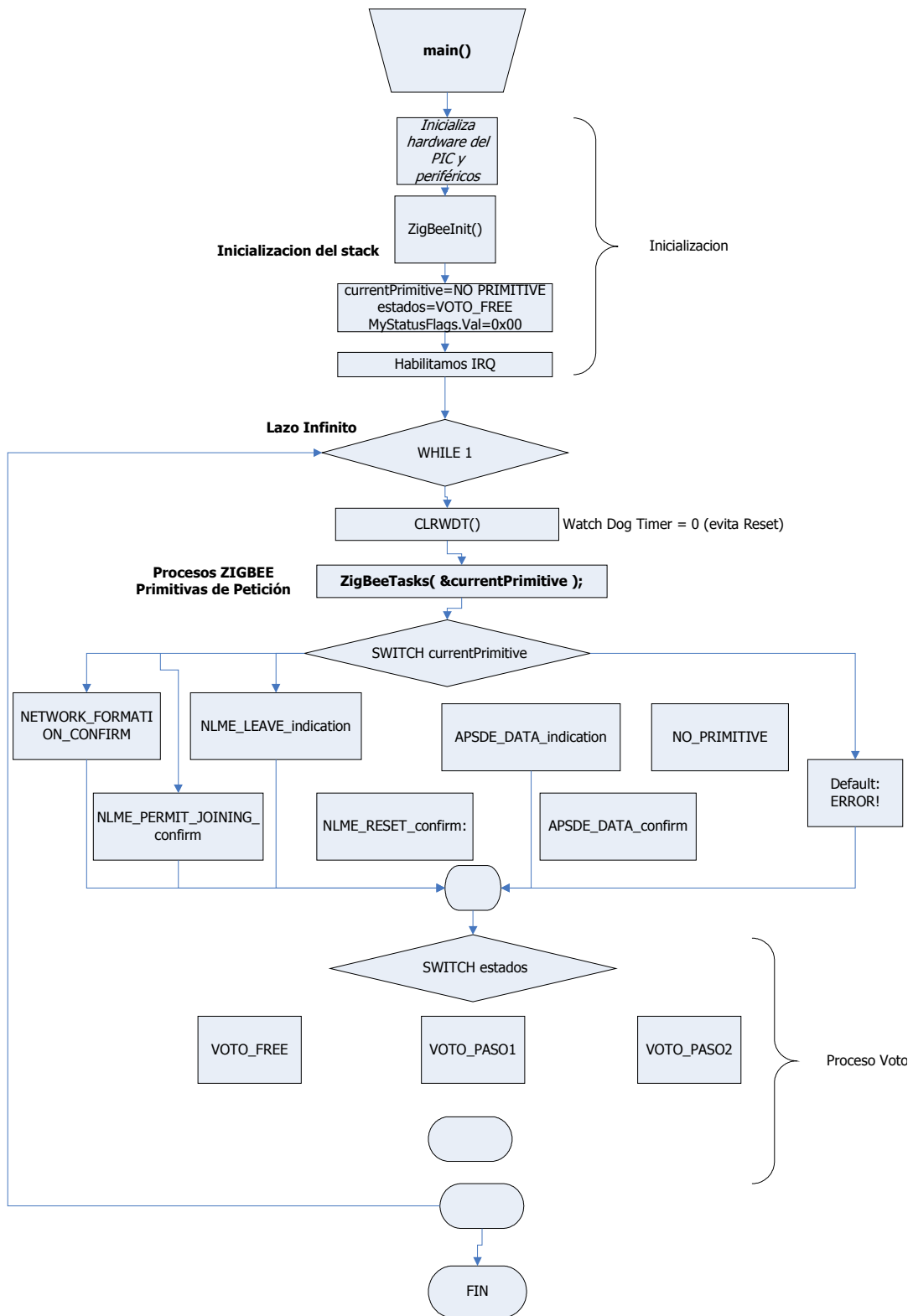


Figura 4-47.Flujo del programa fuente del coordinador

4.1.5.1.3 Etapa de aplicación.

Se realizan los diferentes pasos que se requieren para procesar un voto. La ejecución de los pasos se lo organiza utilizando la sentencia SWITCH-CASE que evalúa a la variable “estados”. Los pasos a ejecutar se describen en la tabla 4-8.

Tabla 4-21. Estados o pasos de la etapa aplicación en el Coordinador

Paso	Denominación	Descripción
0	VOTO_FREE	No se realiza ningún proceso de Voto. Solo avanza al siguiente paso, una vez recibido datos por el stack Zigbee de un terminal.
1	VOTO_PASO1	Recibe datos de un terminal Zigbee y se envían serialmente al ordenador por su procesamiento. Se avanza al paso 2
2	VOTO_PASO2	Se espera respuesta del ordenador, los datos recibidos son nuevamente enviados a los terminales. Para ello se activa la bandera de transmisión para que NO_PRIMITIVE prepare el paquete para su envío.
		Finalmente, se regresa al paso 0 por datos de cualquier terminal.

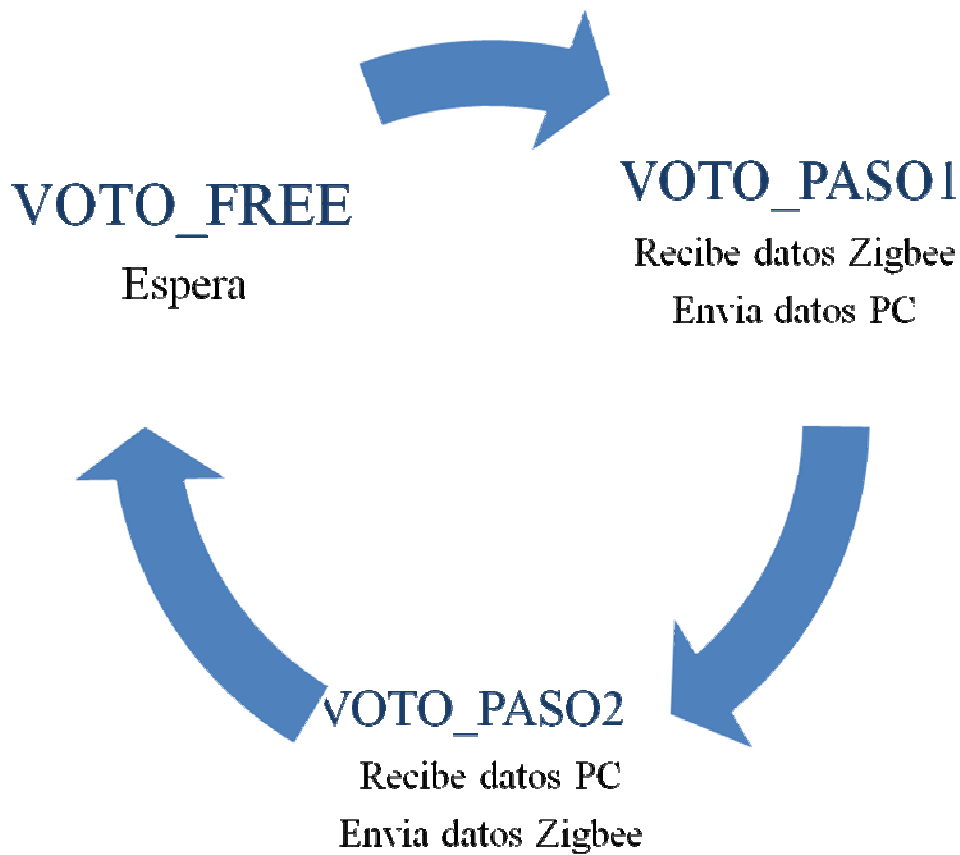


Figura 4-48. Ciclos de ejecución de la etapa aplicación en el Coordinador

4.1.5.2 Terminales.

Al igual que el código de aplicación del coordinador, se divide en inicialización, procesos Zigbee y etapa de aplicación, diferenciándose principalmente en esta última.

4.1.5.2.1 Inicialización.

En esta etapa se configuran los puertos del microcontrolador, se inicializa el stack Zigbee.

4.1.5.2.2 Etapa Zigbee.

Aquí se procesan cada una de las primitivas Zigbee en la capa APL/APS. Las primitivas más importantes para el programador en el terminal son *DATA_INDICATION*, *NO_PRIMITIVE*, *NLME_SYNC_REQUEST*, las cuales permiten procesar los datos recibidos, llamar al proceso de envío y requerir datos del coordinador respectivamente.

Tabla 4-22. Principales primitivas Zigbee utilizadas en el terminal.

Paso	Descripción
DATA_INDICATION	Recibe notificación de la recepción de datos.
NO_PRIMITIVE	Permite preparar y llamar a las primitivas de petición para la unión a la red (JOIN request), para enviar datos (DATA request) y requerir datos del coordinador (SYNC request)
SYNC_REQUEST	Primitiva llamada en NO_PRIMITIVE para requerir datos del coordinador. (Recordar que un RFD usualmente está dormido y los datos son guardados en el dispositivo padre).

4.1.5.2.3 Etapa de aplicación.

Se realizan los diferentes pasos que se requieren para llegar a recolectar un voto. La ejecución de los pasos se lo organiza utilizando la sentencia SWITCH-CASE que evalúa a la variable 'estados'. Los pasos o estados a ejecutar se describen en la tabla 10.

Tabla 4-23. Pasos o estados de la etapa aplicación del terminal

Paso	Denominación	Descripción
0	VOTO_FREE	No se realiza ningún proceso de Voto. Se espera la presión del pulsador START para despertar al terminal y continuar con el paso 1.
1	VOTO_PASO1	Identificación. Se recolecta datos de identificación del usuario, se transmiten al coordinador Zigbee.
2	VOTO_PASO2	Se recibe y procesa respuesta al proceso de

		identificación proveniente del coordinador/ordenador. Si la respuesta es afirmativa se continúa con el paso 2.
3	VOTO_PASO3	Votación. Se toma el voto del usuario y se realiza la transmisión al coordinador.
4	VOTO_PASO4	Se recibe confirmación del ordenador/coordinador sobre la validez del voto transmitido. Si es válido se comunica al usuario sobre el éxito de todo el proceso.
5	VOTO_PASO5	Se prepara al terminal para reiniciar el proceso para su nuevo uso. Se regresa al paso 0 donde el terminal entra en modo DORMIR

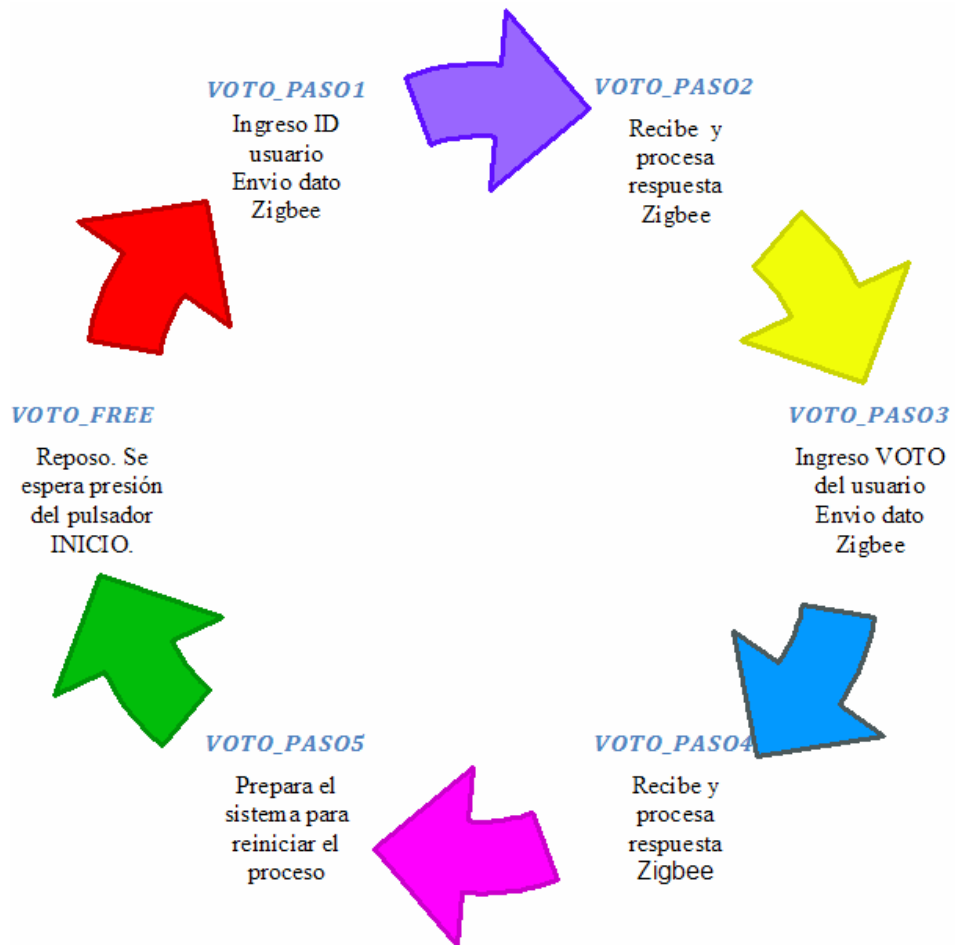


Figura 4-49. Ciclos de ejecución de la etapa aplicación en un terminal

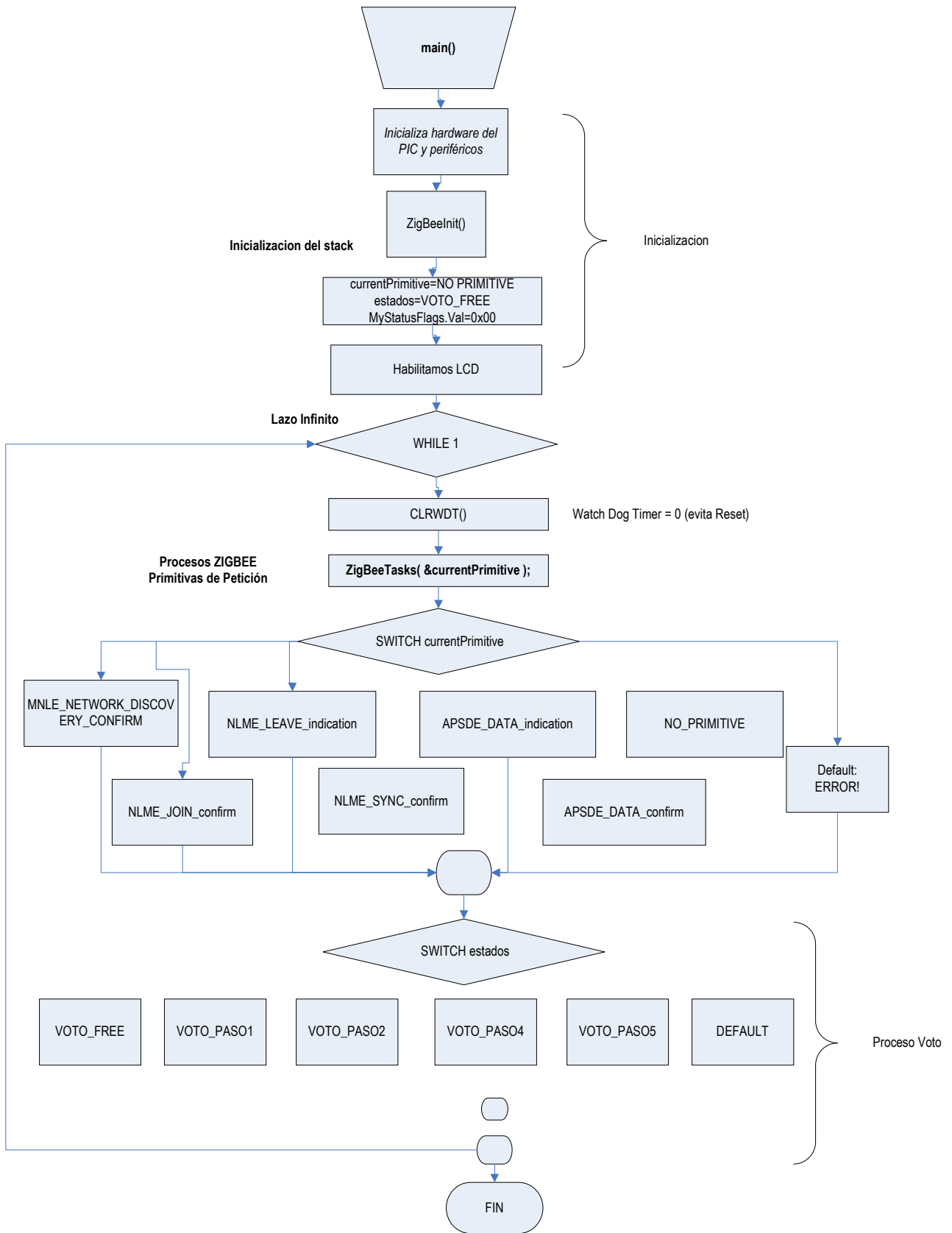


Figura 4-50. Flujo del programa fuente de un terminal.

4.2 DISEÑO DEL SOFTWARE DEL ORDENADOR “VOTOZIGBEE”

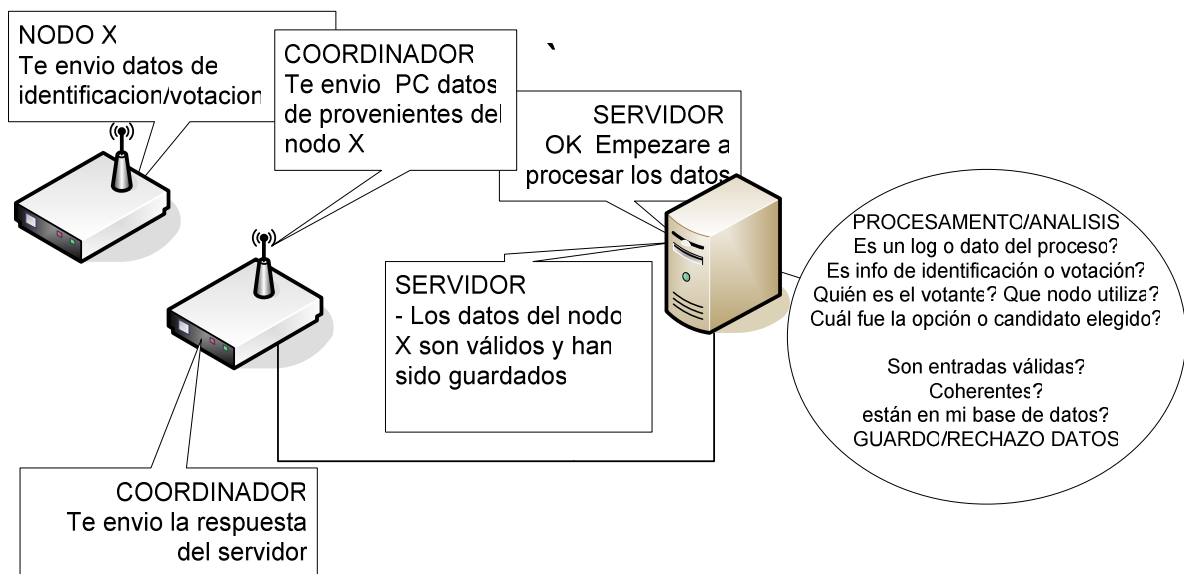


Figura 4-51. Proceso de comunicación de dispositivos

4.2.1 DESCRIPCIÓN

La función de la aplicación, la cual se nombró como “VOTOZIGBEE”, es recolectar, calificar y presentar los datos del proceso de votación. Además se presentan mensajes del sistema (conocidos comúnmente como logs) para facilitar su administración.

El programa es responsable de filtrar la información recibida desde los nodos Zigbee, identificando la coherencia y veracidad de los datos antes de ser aceptados.

Para ello, la aplicación se compone de tres formas o ventanas. Una principal para controlar el proceso, la segunda utilizada para mostrar los mensajes del sistema, y la última para exhibir los resultados finales del proceso.

4.2.2 HERRAMIENTAS DE PROGRAMACIÓN

La creación del programa de administración del sistema de votación es realizado mediante Visual Basic 2005 Express ³⁰ que permite crear aplicaciones de entorno gráfico bajo Windows teniendo la posibilidad de utilizar todos y cada uno de los elementos que forman parte de éste.

Esta aplicación integra módulos para comunicación serial y manejo de bases de datos que son los elementos base que permiten la transmisión/recepción y la administración de los datos que se recogen del proceso electoral.

4.2.3 BASE DE DATOS

La aplicación se soporta en una base de datos para administrar la información de usuarios, los terminales utilizados, los candidatos y/o partidos participantes y el voto suministrado.

La base de datos seleccionada es Microsoft SQL, debido a estar integrada y presenta mayor soporte en Visual Basic.

Tabla 4-24. Descripción de las tablas de la base de datos del proyecto

Nombre Tabla	Descripción
Usuarios	Reúne información de los usuarios o votantes: ID (Número de cédula), contraseña, Nombres, datos personales y los permisos que tiene dentro del proceso.
Devices	Contiene datos acerca de cada nodo que forma la red Zigbee de votación: <i>ID, Direcciones MAC y de red, tipo de dispositivo, permisos, y el ID del usuario que tiene permitido ingresar su voto una vez que se ha identificado correctamente.</i>

³⁰ A diferencia de otras ediciones de Visual Basic disponibles en el paquete Visual Studio, Visual Basic Express 2005 se encuentra como un paquete independiente, su costo es gratuito y no tiene limitaciones que puedan afectar a el proyecto.

Dignidad1	Reúne información de los partidos, candidatos u opciones de voto que se disponen dentro del proceso.
Dignidad2	
Dignidad3	
Votos	Recoge cada uno de los votos ingresados identificando al votante, al nodo utilizado, y al candidato u opción elegida. Además, se suma la información de hora y fecha que es útil para verificar la integridad del sistema y la veracidad de los datos.



Figura 4-52. Organización de base de datos

4.2.4 COMPONENTES DEFINIDOS PARA EL PROYECTO

En el software creado basa su funcionamiento en los componentes de Visual Basic que se detallan en la tabla 4-12.

Tabla 4-25. Principales componentes Visual Basic utilizados

Nombre	Tipo	Descripción
Usart	SerialPort	Permite la transmisión/recepción de datos.
Proyecto_2006DataSet	DataSet	Permite trabajar con una copia en memoria de la base de datos
VotosBindingSource UsuariosBindingSource DevicesBindingSource Dignidad1BindingSource Dignidad2BindingSource Dignidad3BindingSource	BindingSource	Encapsula los datos de las tablas para una forma
VotosTableAdapter UsuariosTableAdapter DevicesTableAdapter Dignidad1TableAdapter Dignidad2TableAdapter Dignidad3TableAdapter	TableAdapter	Conecta las diferentes tablas de la base de datos a la aplicación
VotosDataGridView	DataGridView	Presenta la tabla 'votos' en pantalla (una vez terminado el proceso)

4.2.5 COMUNICACIÓN SERIAL

Utilizando el componente 'SerialPort' presente en Visual Basic 2005, se consigue crear aplicaciones que envíen y reciban datos a través de comunicación serial por puerto serial. Este componente presenta el evento 'DataReceived' que notifica la

recepción de varios caracteres ASCII, los cuales son guardados gracias al método “ReadLine” que lee el buffer de entrada hasta el carácter definido como “Fin de línea”

El componente “SerialPort” utilizado por el proyecto tiene configurado las propiedades señaladas en la tabla 4-13.

Tabla 4-26. Propiedad del componente SerialPort para comunicación serial.

Propiedad	Valor
Velocidad	19200 bps
Bits de datos	8
Bits de parada	1
Umbral	5

4.2.6 PROCESO DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

El código de recolección de datos y su procesamiento se describen a continuación (Ver Figura 4-10):

- a. Cuando se reciben los datos por comunicación serial, se ejecuta el evento DataReceived del control SerialPort.
- b. Se busca y elimina el carácter “~” en la cadena de texto recibida para establecer si son datos del sistema de votación o es información de los eventos de sistema (logs). En caso de ser un evento, se envía a la ventana de “Log de Eventos”.
- c. En caso de ser datos de votación o identificación, se separa la cadena recibida en cadenas de texto más cortas (mediante la función Split de Visual Basic) que contienen cada una datos específicos como número de identificación del usuario, contraseña, identificación del nodo e identificador del candidato elegido.

- d. Se examina la primera cadena, si es igual al caracter 'I', se seguirá un proceso de autenticación del usuario votante y del nodo utilizado. Si el caracter es igual a "V", se continúa con el proceso de validación del voto.
- e. Se consulta en las diferentes tablas de la base de datos, los registros relacionados a los identificadores de usuario, nodo y candidatos recibidos. Notar que en el caso del proceso de validación del voto, la información del usuario se obtiene de la tabla 'nodo', que identifica al usuario que se autentifico y está autorizado a votar en dicho Terminal.
- f. Se prosigue con una validación de la información recibida con el objeto de determinar que estos son coherentes y que se encuentran presentes en la base de datos. En caso de invalidez de los datos o no existir presentes en la base de datos, se envía un mensaje de error al coordinador para ser transferido al terminal correspondiente.
- g. Finalmente, si los datos son válidos se transmiten serialmente una respuesta de éxito al coordinador para ser enviado al terminal correspondiente. Una identificación exitosa habilita al nodo y al usuario a proseguir con el proceso de voto. En cambio, un voto válido será guardado en la tabla "Votos" y deshabilita al usuario para impedirle repetir el sufragio.

Una vez culminado el proceso, se dispondrá de los votos receptados en la tabla "Votos", a partir de este se obtendrá un reporte de los resultados del evento electoral.

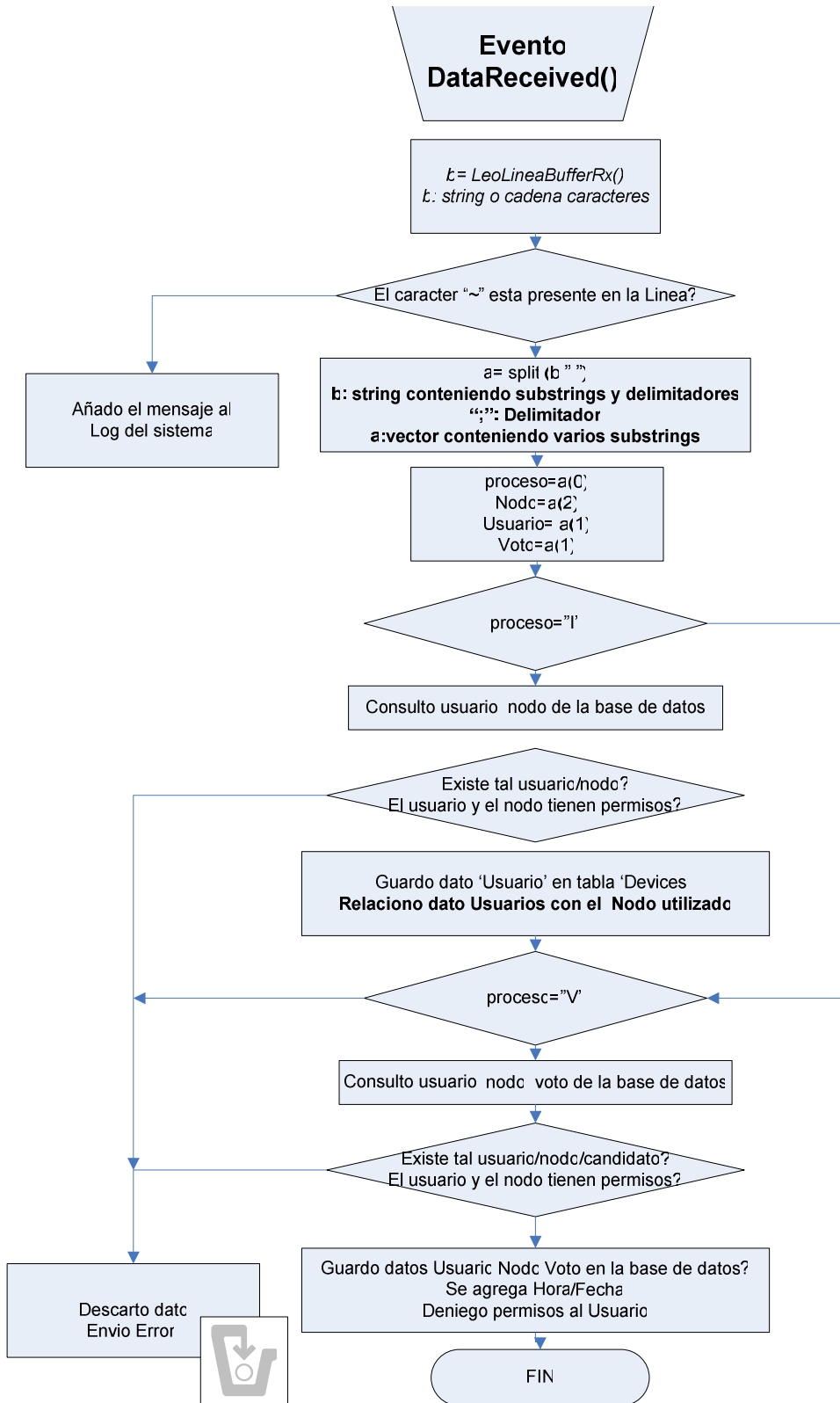


Figura 4-53. Flujo evento de recepción de datos del software de control del servidor.

4.2.7 PROGRAMA DE CONFIGURACIÓN “CANDIDATOS ZIGBEE”

CONFIGURACION OPCIONES DE SUFRAGIO

	Dignidad 1	<input type="text" value="Decano"/>	
	Número candidatos	<input type="text" value="4"/>	<input type="button" value="Editar"/>
Número dignidades	Dignidad 2	<input type="text" value="Profesores"/>	
<input type="text" value="3"/>	Número candidatos	<input type="text" value="4"/>	<input type="button" value="Editar"/>
	Dignidad 3	<input type="text" value="Estudiantes"/>	
	Número candidatos	<input type="text" value="4"/>	<input type="button" value="Editar"/>
<input type="button" value="Generar Archivos"/>			

Figura 4-54. Ventana de configuración de dignidades y candidaturas

Adicionalmente, como ayuda al administrador del evento electoral, se implementó un sencillo programa, nombrado como “Candidatos Zigbee” para configurar el número de dignidades (fig. 4-11) y la lista candidatos (fig. 4-12); ya que esta información varía en cada evento electoral. Su propósito es la generación del archivo para ser cargado en la memoria del microcontrolador con el fin de que conozca estos datos y despliegue los nombres de las candidaturas en la pantalla del LCD ante el votante, al tiempo que actualiza la base de datos a ser utilizada por el programa de control de sufragio.

Para actualizar la información de candidaturas, se requiere compilar y grabar el microcontrolador para cada proceso electoral mediante el interfaz de programación ICD 2 incluido en cada terminal. Debido a que los eventos de sufragio son efectuados con el debido tiempo de preparación y el proyecto se dirige a grupos electorales reducidos, esta limitación no representa un problema.

	idOpcion	ListaPartido	Candidato	FechaInscripcion	Habilitado		
▶	0	Nulo	...	Nulo	...	01/08/2006	<input checked="" type="checkbox"/>
	1	A	...	G.Davila/C.Hierr...	10/08/2006	<input checked="" type="checkbox"/>	
	2	B	...	J.Herrera/L.Lima ...	13/08/2006	<input checked="" type="checkbox"/>	
	3	C	...	N.Mina/S.Diaz ...	11/07/2006	<input checked="" type="checkbox"/>	
	4	D	...	K.Arevalo/Corne...	30/07/2006	<input checked="" type="checkbox"/>	
	5	E	...	Lucio/Gate	...	01/07/2006	<input checked="" type="checkbox"/>
*							<input type="checkbox"/>

Figura 4-12. Ventana de edición de candidaturas

4.3 SEGURIDADES

La seguridad es un aspecto importante en los eventos electorales; fallas importantes en el sistema pueden comprometer la veracidad de los datos. Por ello, en el software se implantaron las siguientes soluciones:

🔑 Autenticación de votantes.

Se estableció el proceso de identificación/autenticación de usuarios mediante el requerimiento del número de identificación del sufragante y su respectiva contraseña. Estos datos llegan al servidor para ser comparados con los existentes en la base de datos del proceso de votación.

🔑 Lista de acceso de terminales.

En la base de datos, se implementó una tabla de terminales que permite verificar que el nodo es parte del sistema. Un terminal envía información acompañado de la dirección de red del nodo, permitiendo con ello consultar en la base de datos si dicho nodo es parte de la red.

🔑 Desautorización de usuarios.

La inhabilitación de un usuario, una vez que éste ya ha hecho uso de su derecho al voto. Con ello se evita que un usuario realice más de un voto con el mismo número de identificación.

✚ Señales/indicadores de operación.

La utilización de un terminal es informada mediante un indicador de color en el programa de control del sufragio VOTOZIGBEE. Gracias a este indicador, el administrador puede examinar si el sistema está siendo utilizado adecuadamente y prevenir/corregir cualquier anomalía en su uso o funcionamiento.

✚ Mensajes de operación del sistema (System Log).

Mediante una ventana de información, el servidor informa de los diferentes eventos que ocurren durante el funcionamiento del sistema. Con la ayuda de ello, se pueden verificar procesos Zigbee y corregir fallas en la operación del sistema.

PRUEBAS Y RESULTADOS

CAPITULO 5.

PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1 GENERALIDADES

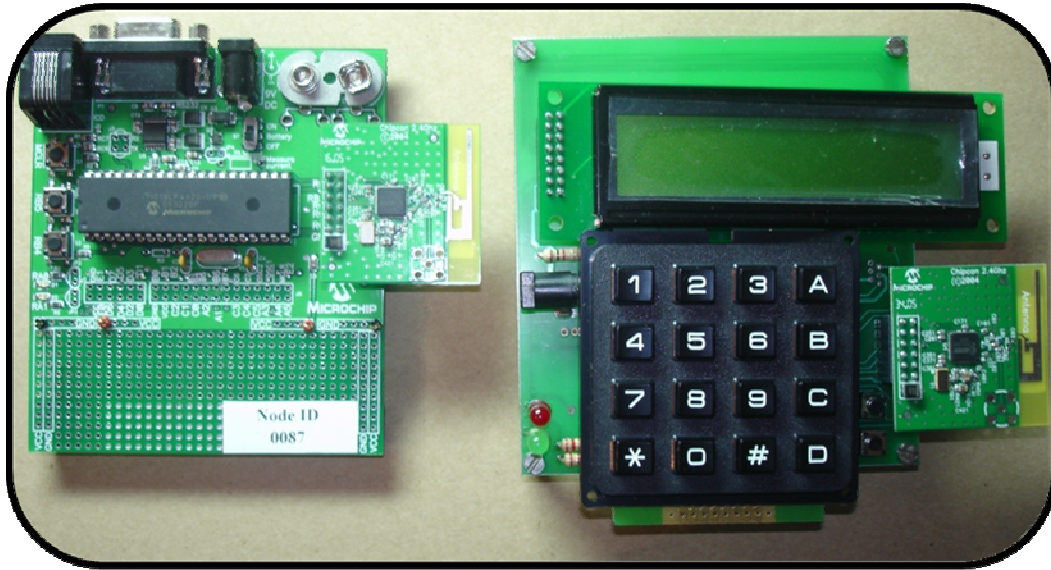


Figura 5-1. Nodos Zigbee implementados: Coordinador (PICDEM Z) y Terminal.

El capítulo describe los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a los equipos que conforman el proyecto. Se realizaron pruebas a nivel eléctrico, consumo de potencia, radiofrecuencia y monitoreo de paquetes.

5.2 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

5.2.1 SUMINISTRO DE VOLTAJE

Esta prueba comprobó el comportamiento del hardware para corregir y/o descartar problemas con alimentación de los componentes electrónicos. Para ello se midió los valores de voltaje de alimentación en cada nodo.

Tabla 5-27 Valores de voltaje medidos en el coordinador

COORDINADOR	VOLTAJE DC
FUENTE 9 VDC	9.0 V

SALIDA REGULADOR 3.3 VDC	3.28 V
--------------------------	--------

Tabla 5-28. Valores de voltaje medidos en el terminal

TERMINAL	VOLTAJE DC
ALIMENTACIÓN 9V	9 V
SALIDA REGULADOR 5V (LCD)	4.9 V
SALIDA REGULADOR 3.3V	2.90

El rango operativo de voltaje del PIC 18LF4620 está entre 2.0 y 5.5 V, del CC2420 está entre 2.1 y 3.6 V, y del display LCD en alrededor de 5V. De ello, se establece que los voltajes suministrado son los adecuados para la operación de cada nodo del proyecto.

5.2.2 CONSUMO DE ENERGIA

Esta segunda prueba evidencia el periodo de duración de la batería en los terminales.

La mayor parte del tiempo el nodo terminal se encuentra dormido, con la pantalla del display LCD desactivada, por lo cual se midió la duración de la batería en modo de reposo. De forma similar, se efectuó otra prueba simulando el sufragio de 50 personas.

Tabla 5-29 Duración de batería medida en el terminal

ESTADO DEL TERMINAL	DURACIÓN (min)
En modo de reposo.	9 horas
Reposo + 50 procesos de voto	7 horas

5.2.3 RADIOFRECUENCIA Y PROPAGACIÓN

La siguiente prueba midió la potencia de señal recibida a diferentes distancias (en espacio libre) de los nodos, y se estableció la máxima distancia de trabajo a la que

puede funcionar el sistema. Para la realización de las mediciones de potencia de la señal se utilizó el analizador “IEEE 802.15.4 Sniffer for Pixie & PICDEMZ”.

Tabla 5-30. Potencia de la señal del coordinador recibida en el analizador

DISTANCIA (metros)	SEÑAL (dBm)
Potencia de salida	0
1	-46
2	-53
5	-59
10	-69
20	-70
30	-74
40	--79
50	-78

Tabla 5-31. Potencia de la señal del terminal recibida en el analizador

DISTANCIA (metros)	SEÑAL (dBm)
Potencia de salida	0 dBm
1	-45
2	-54
5	-60
10	-68
20	-71
30	-75
40	-78
50	-80
MAXIMA DISTANCIA DEL COORDINADOR: 60 metros	-90

De los datos exhibidos en las tablas 5-4 y 5-5, se observa que el alcance del sistema es de 60 metros con línea de vista, y que los valores de señal receptada del terminal y el coordinador son muy similares. Esto se justifica, ya que utilizan el mismo

tranceiver (CC2420) y antena, por lo tanto cada nodo tiene la misma potencia de salida y sensibilidad.

5.2.4 FUNCIONAMIENTO DE LA RED ZIGBEE

La prueba consistió en comprobar el funcionamiento de la comunicación entre los terminales y el coordinador. Para ello, se utilizó como apoyo los mensajes (logs) del sistema creado dentro del software del servidor y el analizador de paquetes (Sniffer IEEE 802.15 for Pixie & PICDEMZ”).

5.2.4.1 Análisis mediante el mensajes (logs) del sistema

Los mensajes del sistema muestran los procesos ocurridos en el nodo coordinador. La información desplegada permite informarse acerca de la correcta formación de la red, la unión de los terminales, la recepción de datos en el coordinador y la transmisión de datos hacia un terminal. Esto es una herramienta esencial para encontrar y corregir fallas en los procesos relacionados con Zigbee.

La figura 5-2 muestra un ejemplo de los mensajes del sistema desplegados por la aplicación del servidor. La información acerca del funcionamiento de la red se diferencia en la tabla 5-6.

Tabla 5-32. Mensajes del sistema

Acción	Mensaje/log del sistema obtenido
Formación de red	“PAN <Dirección Red> inicio con éxito”
Asociación de un nodo a la red	“Nodo <Dirección Nodo> se ha unido”
Enviar datos del coordinador	“Mensaje enviado con éxito”
Recepción datos en el coordinador	“Mensaje Recibido”

```

12/09/200612/09/2006 23:18:48
*****
Microchip ZigBee(TM) Stack - v1.0-3.6

Coordinador ZigBee para el Sistema de Voto

Transceiver-CC2420

12/09/200612/09/2006 23:18:48
Intentado iniciar red...
12/09/200612/09/2006 23:18:49
PAN 3622 inicio con exito.
Union permitida.
12/09/200612/09/2006 23:19:09
Nodo 796F se ha unido
12/09/200612/09/2006 23:19:54
Mensaje Recibido.
12/09/200612/09/2006 23:19:57
Intentando enviar respuesta.
12/09/200612/09/2006 23:19:57
Mensaje enviado con exito.
    
```

Figura 5-2. Ejemplo de mensajes del sistema

5.2.4.2 Análisis mediante el analizador/sniffer.

Esta herramienta muestra la composición de los mensajes transmitidos bajo el protocolo Zigbee/IEEE 802.15.4, permitiendo distinguir y verificar la información de la carga útil (payload) y de las cabeceras que se agregan en cada capa de la arquitectura.

Tabla 5-33. Código de colores utilizados por el analizador

Color	Datos	Color	Datos
Gris	Info PHY	Azul	Datos NWK
Blanco	Datos MAC	Amarillo	Datos APL
Verde	ACK MAC	Púrpura	Datos AF/ZDO
Amarillo	Beacon MAC	Rojo	Errores
Rojo	Comandos MAC		

A continuación, se describen los procesos de comunicación Zigbee que se pueden examinar.

5.2.4.1 Formación de la red

En la figura 5-3 se observa la red Zigbee formada por el coordinador y que es detectada por el analizador. Se identifica el canal RF utilizado, el número de redes que coexisten en dicha frecuencia y la potencia de la señal receptada.

2405MHz	2410MHz	2415MHz	2420MHz	2425MHz
ED N/A	ED N/A	ED N/A	ED N/A	ED N/A
0 PANs	1 PAN	0 PANs	0 PANs	0 PANs
	-84 dBm PS			

Figura 5-3. Canales de frecuencia y red PAN formada

5.2.4.2 Asociación a la red

Inicialmente, el terminal realiza un requerimiento en broadcast para identificar a los posibles padres. El coordinador responde con una trama MAC de baliza o beacon para informar su dirección PAN y de red (SrcPAN & SrcAdd), su capacidad como coordinador PAN (campo PC) y la autorización existente de unirse a la red (campo AP).

Type	Encr	Pnd	Ack	Seq	DstPAN	DstAdd	Beacon
Cmd	No	No	No	64	FFFF	FFFF	Request

Type	Encr	Pnd	Ack	Seq	SrcPAN	SrcAdd	BO	SO	CAP	BLE	PC	AP	GTSC	GTSP	SP	LP
Bcn	No	No	No	0E	3390	0000	0F	0F	0F	No	Yes	Yes	00	No	00	00

Figura 5-4. Búsqueda del terminal por una red PAN y respuesta del coordinador.

Identificada y seleccionada una red, el terminal envía un pedido de asociación, enviando su dirección MAC e identificándose como un dispositivo RFD (usualmente dormido). Por ello, el terminal debe hacer un segundo requerimiento con el fin de obtener la respuesta. Finalmente, el coordinador responde el requerimiento asignando al terminal RFD una dirección de red.

Type	Encr	Pnd	Ack	Seq	DstPAN	DstAdd	SrcPAN	SrcAdd	Association	AP	Type	Power	Idle	Rx	Sec	Shrt
Cmd	No	No	Yes	65	3390	0000	FFFF	0004A30000000066	Request	No	RFD	Battery	Off	No	Yes	

Type	Encr	Pnd	Ack	Seq	DstPAN	DstAdd	SrcPAN	SrcAdd	Data
Cmd	No	No	Yes	66	3390	0000	Same	0004A30000000066	Request

Type	Encr	Pnd	Ack	Seq	DstPAN	DstAdd	SrcPAN	SrcAdd	Association	Addr	Status
Cmd	No	No	Yes	0F	3390	0004A30000000066	Same	0004A30000000054	Response	796F	OK

Figura 5-5. Unión a la red

5.2.4.3 Re-asociación a la red

Inicialmente el terminal envía un mensaje de broadcast con su dirección MAC y la notificación a nivel de red de ser un dispositivo huérfano que ya pertenecía a una red. A continuación el coordinador se presenta ante el terminal y le asigna una dirección de red. En caso que ningún dispositivo responda, el terminal inicia el proceso de asociación como dispositivo nuevo.

Type	Encr	Pnd	Ack	Seq	DstPAN	DstAdd	SrcPAN	SrcAdd	Orphan
Cmd	No	No	No	E5	FFFF	FFFF	FFFF	0004A30000000066	Notification

Type	Encr	Pnd	Ack	Seq	DstPAN	DstAdd	SrcPAN	SrcAdd
Cmd	No	No	Yes	C2	FFFF	0004A30000000066	3D5F	0004A30000000054
Coordinator	PAN ID	My Add	Chan	Your Add				
Realignment	3D5F	0000	0C	796F				

Figura 5-6. Reasociación a la red

5.2.4.4 Envío información del RFD al Coordinador.

La figura 5-7 muestra el mensaje enviado por el terminal al coordinador. Notar que se identifica la red (PAN), los nodos, los endpoints, el clúster, el perfil de la aplicación utilizado y el atributo a cambiar. En el ejemplo, la cadena de caracteres enviada a nivel de la capa AF representa el proceso de identificación (I), el número de identificación del votante (1717664344), su contraseña (1313) y el identificador del nodo en la base de datos (2).

Type	Encr	Pnd	Ack	Seq	DstPAN	DstAdd	SrcPAN	SrcAdd																	
Data	No	No	Yes	62	3390	0000	Same	796F																	
Type v	Disco	Encr	Dest	Src	r	Seq	Type	Dlvry	IDM	Encr	Ack	DstEP	C1st	Prfl	SrcEP										
Data	01	Enable	No	0000	796F	0A	31	Data	Direct	NoS	No	No	01	13	FFFF	01									
#Tr	Type	Seq	Type	Type	Attr	Hex Val						Value													
01	KVP	00	Set	Char	0000	13	49	2C	31	37	31	37	36	36	34	33	34	34	2C	31	33	31	33	2C	I.1717664344.1313.2

Figura 5-7. Envío de información al Coordinador.

5.2.4.5 Petición del terminal (RFD) y envió de datos desde coordinador.

En la figura 5-8, se observa el proceso de requerimiento de datos de un terminal a un coordinador (usualmente, los terminales RFD están dormidos y no están escuchando el canal, por ello el coordinador tiene la tarea de guardar los mensajes

hasta que el terminal los solicite mediante un 'Data Request'). Una vez que el coordinador ha escuchado un requerimiento de datos de un terminal, envía cualquier mensaje pendiente que tenga para él.

Type	Encr	Pnd	Ack	Seq	DstPAN	DstAdd	SrcPAN	SrcAdd	Data Request							
Cmd	No	No	Yes	04	2750	0000	Same	796F								
Type	Encr	Pnd	Ack	Seq	DstPAN	DstAdd	SrcPAN	SrcAdd								
Data	No	No	No	E1	2750	796F	Same	0000								
Type	v	Disco	Encr	Dest	Src	r	Seq	Type	Dlvry	IDM	Encr	Ack	DstEP	Clst	Prfl	SrcEP
Data	01	Enable	No	796F	0000	0A	AD	Data	Direct	NoS	No	No	01	13	FFFF	01
#Tr	Type	Seq	Type	Type	Attr	Hex	Val	Value								
01	KVP	01	Set	Char	0000	01	78	x								

Figura 5-8. Requerimiento del terminal RFD y envío de datos desde coordinador

5.2.5 FUNCIONAMIENTO DE LA APLICACIÓN

Para finalizar, la prueba busca descartar y/o buscar fallas a nivel aplicación del proyecto de Votación.

5.2.5.1 Terminal de votación

La verificación de funcionamiento de la aplicación del terminal se la realiza mediante la interacción con los dispositivos de entrada/salida de datos y simulando el proceso de sufragio. Las figuras 5-9 y 5-10 muestran el correcto comportamiento del terminal.



Figura 5-9. Interacción con el teclado y LCD: Proceso de identificación.



Figura 5-10. Mensaje LCD: Proceso de votación

5.2.5.2 Coordinador

El buen funcionamiento del coordinador puede ser corroborado mediante los LEDs indicadores, y los mensajes del sistema que se exhiben en la aplicación creada para servidor.

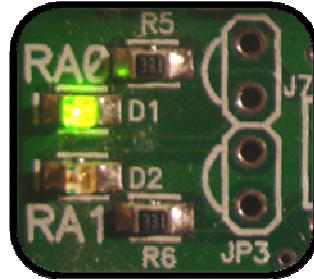


Figura 5-11. LEDs indicadores del Coordinador

Tabla 5-34. Diagnóstico del coordinador utilizando los LEDs indicadores

LED	ESTADOS	DIAGNOSTICO
D1	Encendido: Nodo inicializado y operativo	Indica la alimentación y la inicialización del nodo adecuadas
D2	Encendido: Comunicación en progreso Apagado: Esperando datos.	Verifica la comunicación. Permite establecer si el coordinador se halla “colgado”, si el LED se halla encendido durante un lapso mayor a 1s.

5.2.5.3 Software del ordenador.

El control del correcto funcionamiento de la aplicación del servidor “VOTOZIGBEE” se establece mediante simulacros de procesos de votación, la verificación se detalla a continuación:

- La comunicación serial con el coordinador se verifica mediante el correcto despliegue de mensajes (logs) del sistema.
- Mediante simulacros de sufragio se corroboran el correcto procesamiento y tabulación de los votos. Los indicadores de actividad permiten comprobar que un nodo se encuentra activo y transmitiendo datos. La aplicación presenta el nombre de cualquier usuario que se encuentre autenticado en un nodo y cuantos votos se han recolectado en el sistema.

- Finalmente terminando el proceso de sufragio, se verifica la correcta recolección y procesamiento de los votos mediante los resultados exhibidos en la tabla de votos recogidos y en la ventana de resultados.



Figura 5-12. Ventana de aplicación iniciado el proceso de votación

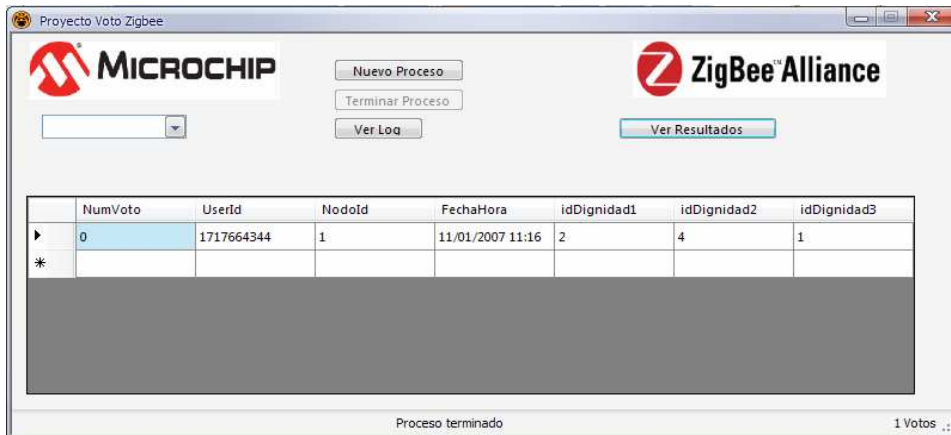


Figura 5-13. Ventana de aplicación terminado el proceso

CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

6.1.1 SISTEMAS DE VOTACIÓN ELECTRONICO

- Se corroboró la factibilidad de la implementación de una red electrónica inalámbrica para aplicación en el área electoral. Los datos obtenidos en el sistema electrónico tiene una mayor eficiencia, confiabilidad y seguridad que los adquiridos en procesos de sufragio convencionales. La tabulación automática de los datos una vez finalizada la elección permite conocer resultados de forma inmediata.
- La confiabilidad y seguridad son dos ámbitos primordiales en un proceso electoral. Vulnerabilidades en la seguridad pueden provocar la pérdida de confiabilidad de los resultados entregados por el sistema, por ello las soluciones deben ser implementadas a nivel general en cada una de las capas de la arquitectura utilizada para implementar la red de sufragio.

6.1.2 TECNOLOGIA ZIGBEE/IEEE 802.15.4

- Se exhibió que la tecnología Zigbee, desde el punto de vista técnico, permite crear soluciones de bajo costo que requieren implementar redes que necesitan un ancho de banda reducido y bajo consumo de potencia. La utilización de perfiles certificados para la elaboración de aplicaciones garantiza la interacción y compatibilidad de los productos creados por diferentes casas fabricantes.

- Las ventajas técnicas presentadas y el gran patrocinio dado por diferentes empresas fabricantes (Microchip, Chipcon, Phillips, Freescale, Texas Instrumente, entre otros) a favor del protocolo Zigbee, motiva a creer que se llegará a producir productos basados en esta tecnología en forma masiva. Sin embargo, nada garantiza la explosión de dicha tecnología dentro del mercado de consumo, ya que ello depende en gran parte de las propuestas comerciales y acuerdos económicos en lugar del aspecto técnico.
- La topología estrella maestro/esclavo con tráfico intermitente descrita dentro del estándar Zigbee/IEEE 802.15.4 permitió crear la red de sufragio planteada. La utilización de dispositivos de funciones reducidas (RFD) posibilitó implementar terminales de voto de bajo consumo de potencia, mientras que el coordinador tuvo la labor de administrar la red y recibir información para ser enviada al ordenador para su procesamiento.

6.1.3 HARDWARE

- Se expuso que Zigbee requiere de dispositivos muy sencillos, un microcontrolador (de 8 bits) y de un transceiver RF cuyas dimensiones, potencia y costos muy reducidos son un factor a favor de la masificación de la tecnología. El transceiver RF tiene como responsabilidad soportar las capas definidas por el estándar IEEE 802.15.4, es decir, la capa física y de acceso al medio. Mientras, el microcontrolador tiene a su cargo controlar el transceiver y soportar las capas de red y aplicación definidas por el estándar Zigbee.
- Las características y funcionalidades de un producto se ven limitadas al costo. El incremento de funcionalidades y la utilización de dispositivos de mejores características implica un aumento del costo de implementación de un equipo. El diseñador debe balancear la relación costo-beneficio con el objeto de que su producto cubra satisfactoriamente las necesidades requeridas, manteniendo un precio atractivo para su comercialización.

6.1.4 SOFTWARE

- Un aspecto atractivo en la implementación del proyecto es la apreciación clara de las ventajas de una arquitectura de capas, gracias a la utilización del “Stack Zigbee de Microchip” se permitió concentrar los esfuerzos en la implementación del código a nivel aplicación, configurando únicamente los parámetros básicos requeridos en las capas inferiores.
- El lenguaje C mostró su gran adaptabilidad y poder, al permitir implementar una arquitectura de red utilizando un sencillo microcontrolador.
- En los códigos de aplicación implementados para los microcontroladores, los procesos especificados en el protocolo Zigbee se organizan en primitivas. Igualmente, los eventos relacionados al sufragio se organizan mediante estados, que evalúan si el nodo se encuentra en proceso de identificación o de emisión del voto.
- Para la optimización de la energía de la batería presente en cada terminal de votación, se programó al microcontrolador para desactivar el transceiver, apagar la pantalla del LCD , y entrar en modo dormir. El estado de suspensión permanecerá hasta que un usuario active el sistema para empezar la identificación.
- Gracias a VisualBasic se creó ágilmente una aplicación gráfica en un ordenador que se conecta serialmente al coordinador, administra la información receptada, los tabula rápidamente y presenta los resultados de forma confiable. El programa instaurado es muy intuitivo y de fácil uso, facilitando la administración de los procesos de votación.

- Adicionalmente, se reconoció la importancia de las bases de datos para administrar y manejar datos. El uso de tablas y la conexión entre ellas, permitió comprobar la idoneidad de la información para su consiguiente almacenamiento, tabulación y generación de los resultados.
- Se mostró la utilidad de las herramientas de análisis y monitoreo, tal como los mensajes o “logs” de sistema y los analizadores o “sniffers”, para verificar la correcta conformación de los mensajes intercambiados por los nodos de una red y depurar con ello los códigos de las aplicaciones en el microcontrolador y el ordenador.
- Al momento de ubicar los nodos se debe comprobar la seguridad del recinto o lugar de votación, las fuentes de interferencia, objetos y estructuras que debiliten las señales. Pese a ser un proceso controlado “inteligentemente” siempre se requerirá de la asistencia humana para controlar su buen funcionamiento y proteger el sistema ante ataques (físicos o lógicos) inesperados.

6.1.5 CONCLUSIÓN FINAL

- Durante el proyecto se alcanzaron los diferentes objetivos planteados, exponiendo las excelentes prestaciones del protocolo Zigbee y demostrando la factibilidad de un sistema electrónico e inalámbrico de sufragio. Se espera que el sistema presentado sea mejorado de forma continua y llegue a ser utilizado en un proceso de votación oficial. Igualmente, se anhela que el presente trabajo sirva de base para crear proyectos más ambiciosos que utilicen la tecnología Zigbee.

6.2 RECOMENDACIONES

- Perfeccionar y ampliar la red mediante ruteadores que mejoren el alcance del sistema y permitan incrementar el número de posibles nodos dentro de la red. Con ello, se pueden realizar pruebas de tráfico permitiendo depurar el software y formando redes de topologías de mayor complejidad.
- Optimizar la comunicación de los terminales con el usuario mediante la utilización de un LCD gráfico con la suficiente resolución para exhibir logotipos, símbolos o fotografías de las opciones, listas o candidatos que compitan en el proceso electoral.
- Implementar una solución para eliminar la necesidad de programar la memoria del microcontrolador con información de las dignidades y candidaturas para cada nuevo proceso electoral con el objeto de eliminar el interfaz de programación ICD 2. Para ello se propone la utilización de una memoria serial externa cargada con esos datos o implementar mensajes Zigbee en “broadcast” enviados por el coordinador a todos los terminales para informarles de la lista de candidatos. Sin embargo, cualquiera de estas soluciones implicarán nuevos desafíos, mayores costos, aumento del tráfico de la red, y nuevas vulnerabilidades en la seguridad a ser consideradas.
- Separar el proceso de identificación y votación en diferentes nodos o terminales con el objeto de mejorar la seguridad en eventos electoral que involucren grupos de gran número.
- Otra propuesta es implementar sistemas similares con herramientas de desarrollo provistos por otras compañías fabricantes de microcontroladores y módulos comerciales que apoyen la tecnología Zigbee con el objeto de diferenciarlos y seleccionar la mejor opción para el desarrollo de aplicaciones. De forma similar, se puede crear aplicaciones utilizando otras tecnologías

propietarias que se basen en IEEE 802.15.4 y que se asemejan al protocolo Zigbee, con la diferencia de no requerir el proceso de certificación para su comercialización.

- A nivel de hardware, un reto es crear aplicaciones que utilicen un único circuito impreso PCB que incluya el microcontrolador, en un empaque más reducido tal como el QFN (8x8 mm), y el transceiver RF para crear empaques de bolsillo.

BIBLIOGRAFIA

1. ZIGBEE ALLIANCE. www.zigbee.org
2. ESTANDAR 802.15.4 <http://ieee802.org/15/pub/TG4.html>
3. HOJA DE DATOS TRANSCEIVER RF CC2420. CHIPCON. www.chipcon.com
4. SITIO MICROCHIP. www.microchip.com
 - a. ZIGBEE STACK FOR MICROCHIP (AN965). Archivo PDF.
 - b. HOJA DE DATOS PIC 18F4620 (DS39626B). Archivo PDF
 - c. GUIA DEL USUARIO MPLAB C18 (DS51288j). Archivo PDF
 - d. GUIA DEL USUARIO APPLICATION MAESTRO SOFTWARE (DS51328A). Archivo PDF.
 - e. GUIA DEL USUARIO MPLAB ICD2 (DS51331B). Archivo PDF.
 - f. Ayuda de MPLAB IDE. Archivo de Ayuda
5. GUIA DEL USUARIO PIXIE SNIFFER. www.flexipanel.com.
6. Ayuda de Visual Basic 2005. Archivo de Ayuda.
7. <http://www.caba.org/>
8. <http://www.commsdesign.com/>
9. <http://www.designnews.com/>
10. <http://www.extensionmedia.com/>
11. <http://hometoys.com/>
12. <http://www.palowireless.com/zigbee>
13. CURSO DE PROGRAMACION CON C. Fco Javier Ceballos. Editorial Macrobit/Rama. 1era edición